



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Projektleitung Energieforschung

**Meteorologische Voraussetzungen
zur Nutzung der Windenergie**

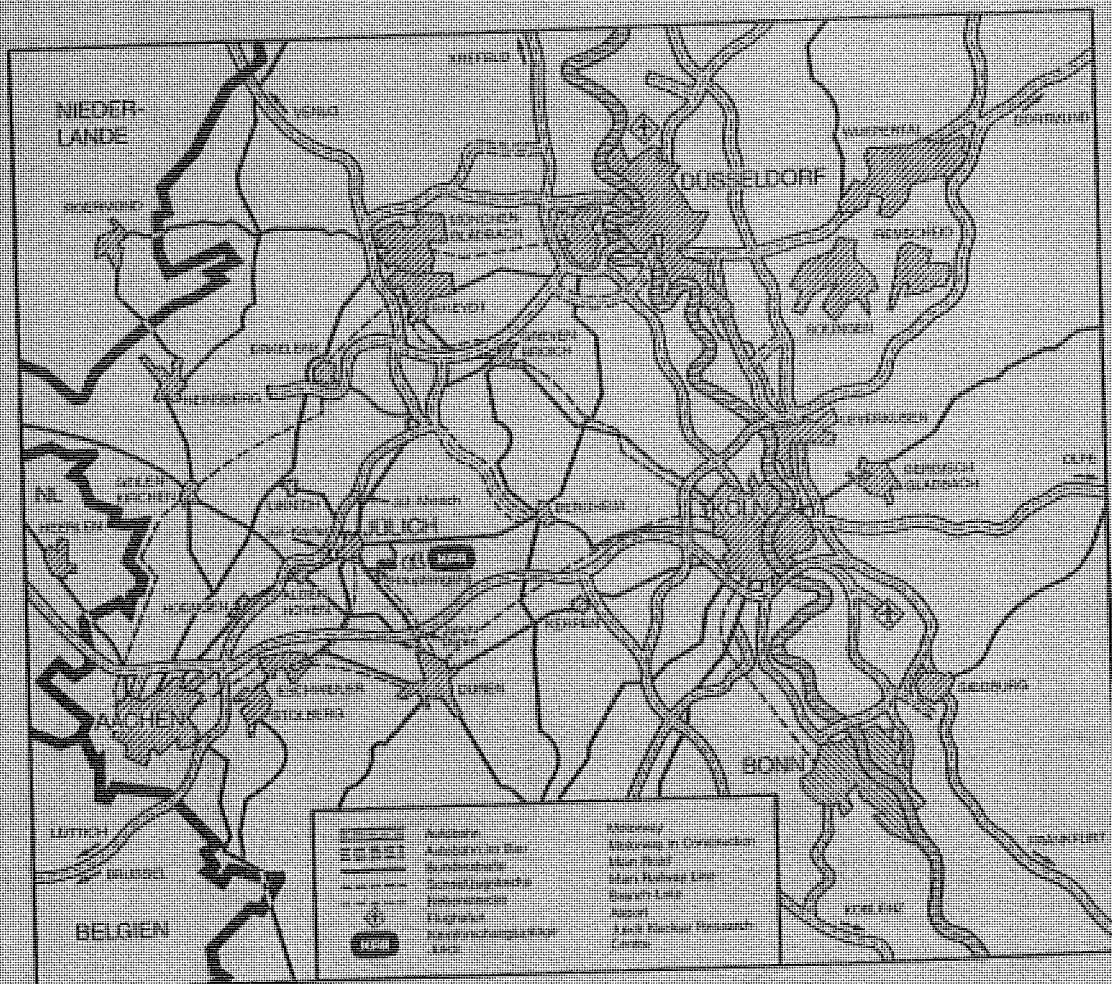
**Seminar über Arbeiten im Rahmen des
Programmes Energieforschung und -technologien
des Bundesministers für Forschung und Technologie
18./19. Mai 1981 in der KFA Jülich**

Herausgeber:

L. Möller und R. Windheim

**Jül - Spez - 132
November 1981**

ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 132
 Projektleitung Energieforschung Jülich - Spez - 132

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
 Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
 Telefon: 02461/610 · Telex: 833556 kfa d

Meteorologische Voraussetzungen zur Nutzung der Windenergie

**Seminar über Arbeiten im Rahmen des
Programmes Energieforschung und -technologien
des Bundesministers für Forschung und Technologie
18./19. Mai 1981 in der KFA Jülich**

Herausgeber:

L. Möller und R. Windheim

Durchgeführt von der
Projektleitung Energieforschung (PLE)
in der Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)
im Auftrag des
Bundesministers für Forschung und Technologie (BMFT)

Inhaltsverzeichnis
=====

	Seite
R. BEYER, Universität Hannover Messungen zur Windenergie im Norddeutschen Küstengebiet	1
R. TRAPP, Universität Hannover Untersuchung zur Nutzung von Windenergie im Mittelgebirge unter der Berücksichtigung von vorhandenen Speichermöglichkeiten	13
G. JURKSCH, Deutscher Wetterdienst Die Windverhältnisse im Binnenland der Bundesrepublik Deutschland im Hinblick auf die Windkraftnutzung (insbesondere Verbund- netzplanung)	24
G. DUENSING, H. SCHMIDT, Deutscher Wetterdienst Die Windverhältnisse im Küstenvorfeld der Bun- desrepublik Deutschland im Hinblick auf die Windkraftnutzung (insbesondere Verbundnetz- planung)	30
G. DUENSING, Deutscher Wetterdienst Die Windverhältnisse in Überseeischen Ländern im Hinblick auf Windkraftnutzung zur Export- förderung der deutschen Industrie	42
W. HALLMANN, R. GRUNDMANN, H. SCHÄFER, Fachhochschule Aachen Entwicklung eines einfachen Windmeßgerätes für Entwicklungsländer	61
H.J. FRIEDRICHS, Theodor Friedrichs & Co. Entwicklung eines einfachen Anemometers zur Klassifizierung des Windes	70

G. NEUWERTH, R. HARTEL, RWTH Aachen Bordgebundenes Verfahren zur Messung von Scherwindgradienten	82
G. DUENSING, Deutscher Wetterdienst Windcharakteristik und Variabilität des Wind- vektors bis zu 200 m Höhe an der deutsche Küste im Hinblick auf die Windkraftnutzung	99
W. BECKRÖGE; K. BERBERICH, G. OBERMAIR ATW GmbH; Universität Regensburg Simultane Windgeschwindigkeitsmessungen hoher Zeitauflösung in verschiedenen großen Höhen für die Auslegung von Windenergiekonvertern	117
H. SCHMIDT, Deutscher Wetterdienst Die Windverhältnisse im Küstenvorfeld der Bun- desrepublik Deutschland im Hinblick auf die Wind- kraftnutzung (insbesondere Verbundnetzplanung)	128
G. TETZLAFF, H. LAUDE, Universität Hannover Vertikale Extrapolation der Windgeschwindig- keit für Mittelwerte und Lastfälle	138
G. DUENSING, H. SCHMIDT, Deutscher Wetterdienst Die Variabilität des Windvektors bis 200 m Höhe an der deutschen Küste im Hinblick auf die Wind- kraftnutzung	185
G. TETZLAFF, S. THEUNERT, Universität Hannover Windmessungen in großer Höhe	196
F. KÖRBER, MAN - Neue Technologie Die große Windkraftanlage und ihre Forderung an die Windmessung	247
Anhang:	
Autorenregister	278
Auszug aus dem Jahresbericht 1980	261

Messungen zur Windenergie im Norddeutschen Küstengebiet

R. Beyer, Universität Hannover

Die Untersuchung der Windverhältnisse im Bereich der deutschen Nordseeküste erfordert ein Datenkollektiv, welches im zeitlichen und räumlichen Scale als repräsentativ für einen Windenergiekonverterstandort angesehen werden kann. Die Beschaffung eines solchen Datenkollektivs stößt jedoch auf Schwierigkeiten, da die routinemäßig arbeitenden Meßnetze nur in 10 Meter Höhe über Grund registrieren und eine Aussage über die mittlere vertikale Struktur nur mit gewissen Einschränkungen möglich ist. Ausgehend von dieser Tatsache besteht also eine Notwendigkeit darin, einen Datensatz für größere Höhen zu beschaffen. Als Grundlage hierzu ist ein Meßnetz aus sechs jeweils 46 Meter hohen Gittermasten entlang der deutschen Nordseeküste aufgebaut worden, an welchen mit einer entsprechenden Instrumentierung und Datenerfassung die Windverhältnisse in der vertikalen Struktur vermessen werden. Die Lage der Meßstationen zeigt die Abbildung 1. Diese liegen bei den Ortschaften Esens, Bremerhaven, Cuxhaven, Tating, Bredstedt und Tewel. Bis auf die Meßstation Tewel sind die übrigen Meßstationen durchweg als küstennah zu betrachten. Die küstennahen Standorte liegen durchweg in einem flachen, wenig gegliederten Gelände, so daß die Bedingung der horizontalen Homogenität in der Umgebung dieser Meßpunkte befriedigend gewährleistet ist. Der Standort Tewel liegt ca. 100 km landeinwärts von der Küste entfernt und dient als Vergleichsmeßpunkt zu den Küstenstationen mit einem in der Umgebung stärker strukturierten Bewuchs, d.h. mit größerer Rauigkeit.

Den prinzipiellen Aufbau der Meßstationen und der Datenerfassung zeigt die Abbildung 2. Die Instrumentierung besteht aus jeweils drei Anemometern in 12, 26 und 46 Meter Höhe, zwei Pt-100 Thermometern in 12 und 26 Metern Höhe zur Messung der Temperaturdifferenz und einer Windfahne in 46 Meter Höhe zur Messung der Windrichtung.

Die Windgeschwindigkeitswerte werden über ein Tiefpaßfilter auf zwei-Minuten Basis gemittelt, während die Windrichtung und die Temperaturdifferenz als Momentanwerte aufgezeichnet werden.

Die Aufzeichnung der Daten geschieht über ein Dataloggersystem, wobei mit einer Frequenz von $1/(2 \text{ Minuten})$ die Meßwerte auf einer Musikkassette abgespeichert werden. Die Meßstationen laufen soweit automatisch, lediglich müssen in einem Rhythmus von ca. 4 Wochen die Kassetten gewechselt und die Batterien für die Stromversorgung gegen frisch geladene ausgetauscht werden. Für die Verarbeitung der Daten werden diese auf einer speziell dafür vorgesehenen Lesestation gelesen und auf 9-Spur Magnetbändern abgespeichert.

Ein wesentliches Ziel in der Verarbeitung der Daten besteht darin, mit Hilfe einer Statistik eine Abschätzung des Windenergieangebotes an dem jeweiligen Standort zu ermöglichen. Dabei wird hier so verfahren, daß die Häufigkeitsverteilung aus den Meßwerten der Windgeschwindigkeit durch eine theoretische Verteilung approximiert wird. Der Grund dafür liegt darin, daß die theoretischen Verteilungen charakteristische Parameter enthalten, welche die Form der Verteilung bestimmen und eine systematische Klassifizierung überhaupt erst möglich machen. Die Auswahl der anzuwendenden theoretischen Funktionen richtet sich dabei im wesentlichen nach den Verteilungsformen der gemessenen Werte. Funktionen, welche nur normal verteilte Werte erzeugen, scheiden hier aus, da die Schiefe der gemessenen Verteilungen stets mehr oder weniger positiv ist und die Verteilungen somit von der Normalform abweichen.

Die im Hinblick auf die Windenergienutzung bekannten und erprobten Funktionen sind in den meisten Fällen 2-Parameter Verteilungen, welche durch die Variation der Parameter die Möglichkeit bieten, sowohl links als auch rechtsschiefe und normal verteilte Werte zu erzeugen. Verteilungen mit mehr als zwei Parametern sind weniger geeignet, da diese dann zu unhandlich werden und die Genauigkeit auch nicht mehr gesteigert werden kann. Für die Approximation wird hier eine Weibull-Verteilung verwendet, da sich 1. die Parameter einfach berechnen lassen

und 2. die Verteilungen durch eine Extrapolation der Parameter für größere Höhen berechnet werden können

Die kumulative Verteilungsform und die Dichteverteilung werden durch die folgenden beiden Funktionen wiedergegeben:

$$\begin{aligned} 1. \quad F(x) &= 1 - e^{-ax^c} \\ 2. \quad f(x) &= acx^{c-1} e^{-ax^c} \end{aligned}$$

Die beiden Größen a und c sind die Parameter der Verteilung und für die Form der Verteilung maßgebend. Die Parameter a und c sind mit dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ über die Γ -Funktion miteinander verknüpft. Damit ergibt sich der Mittelwert μ und die Standardabweichung σ zu

$$\begin{aligned} 3. \quad \mu &= a^{-1/c} \Gamma(1+1/c) \\ 4. \quad \sigma &= a^{-2/c} (\Gamma(1+2/c) - \Gamma^2(1+1/c)) \end{aligned}$$

Bei bekannten Werten des Mittelwertes μ und der Standardabweichung σ bilden die beiden Gleichungen 3 und 4 ein System von zwei Gleichungen mit zwei unbekannten Größen a und c , die sich somit leicht berechnen lassen.

Die Extrapolation der Weibullverteilung auf größere Höhen ist damit gleichbedeutend einer Extrapolation der Parameter, d.h. des Mittelwertes und der Standardabweichung. Die Extrapolation des Mittelwertes erfolgt unter Anwendung des allgemeinen Windgesetzes bei diabatischer Schichtung in Kombination mit einem Potenzgesetz. Da für die Extrapolation der Standardabweichung so gut wie kein Verfahren in der Literatur aufzufinden ist, wird der Weibullparameter c mit Hilfe eines Potenzgesetzes extrapoliert (nach Justus und Mikhail).

Danach wird der Parameter c_2 aus dem Parameter c_1 nach der folgenden Formel berechnet:

$$5. \quad c_2 = c_1 (1 - 0.0881 \ln(z_1/10)) / (1 - 0.0881 \ln(z_2/10))$$

Die Größen z_1 und z_2 sind die Referenzhöhen für die Parameter c_1 und c_2 in Metern.

Die Abbildung 3 zeigt die Auswertung der Meßdaten des Standortes Tating für einen Zeitraum von nahezu zwei Jahren. Die eingezeichneten Kurven stellen die theoretisch approximierten Weibullfunktionen für die gemessenen Werte dar. Die mit +++ eingezeichnete Kurve ist die nach dem obigen Verfahren von 50 Meter Höhe auf 100 Meter Höhe extrapolierte Weibullverteilung. Wie man sieht, fügt sich die extrapolierte Verteilung gut in das Gesamtbild der drei auf Messungen beruhenden approximierten Verteilungen ein.

Eine Aussage über die Repräsentativität dieses Ergebnisses läßt sich durch einen Vergleich mit längerjährigen Mittelwerten durchführen. Zu diesem Problem existieren in der Literatur eine Reihe von Untersuchungen, in denen langjährige Messungen auf die Schwankungen im Mittelwert untersucht wurden.

Corotis et al. (1977) kommt nach einer Auswertung von mehreren Stationen im mittleren Westen der USA zu dem Ergebnis, daß eine Periode von 1-2 Jahren zu einem ausreichend genauen Mittelwert führt.

Für Tating auf Eiderstedt bietet sich als Vergleichsmöglichkeit die Station St. Peter Ording an, die nur wenige Km von Tating entfernt direkt an der Küste liegt. Der 10 m Bodenwind an dieser Station ist im Rahmen einer Windkraftstudie des DWD (1978) für den Zeitraum 1969-1974 ausgewertet worden. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Meßhöhen zwischen St. Peter und Tating um 2 Meter differieren, und zwar liegt die Meßstelle St. Peter 2 Meter unterhalb der Meßstelle von Tating. Die Auswertungen für den sechsjährigen Beobachtungszeitraum

sind wieder in Form einer Summenhäufigkeit dargestellt. Die Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse von St. Peter im Vergleich zu den Ergebnissen des Standortes Tating. Aus dieser Abbildung ist zu ersehen, daß die Verteilung des 10-Meter Bodenwindes sehr gut mit der geglätteten Verteilung der Station Tating übereinstimmt, die Verteilungen für die extrapolierten Werte jedoch deutlich oberhalb der gemessenen Werte für Tating liegen.

Die statistischen Parameter für den Standort Tating sind in der Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt.

DIE LAGE DER MESSTATIONEN

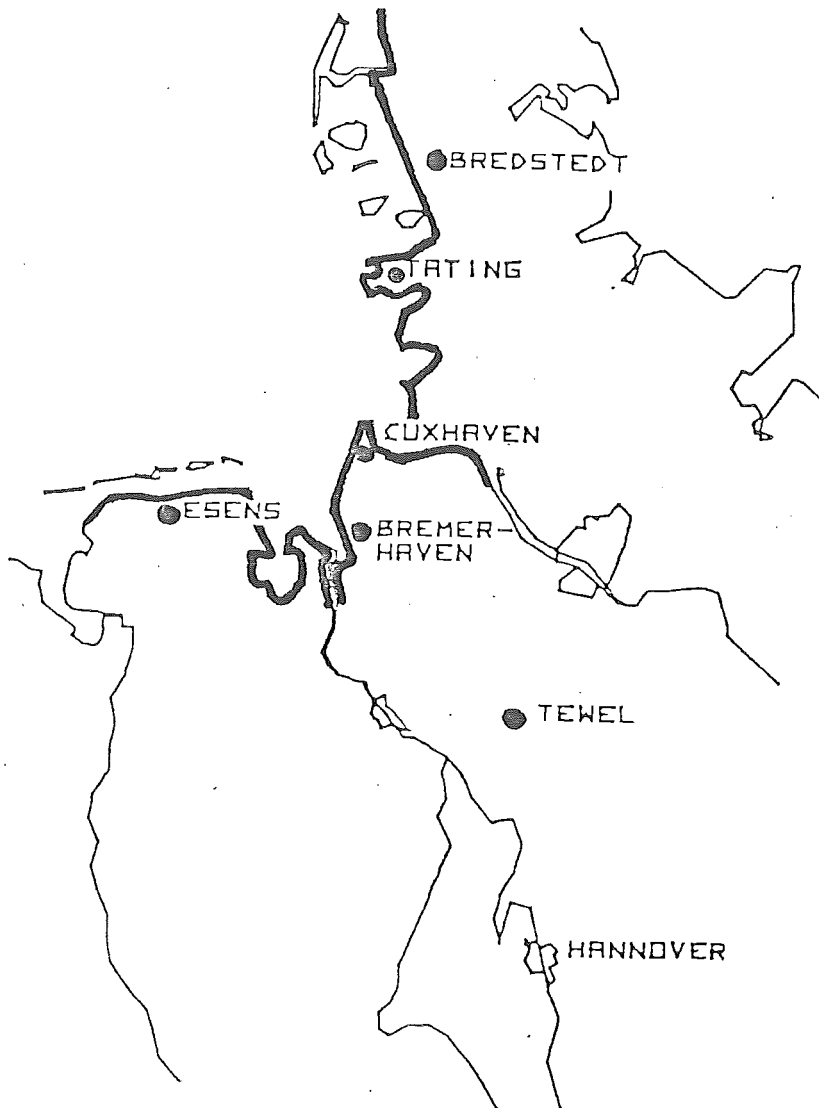


Abbildung 1

DATENFLUSSPLAN DER MESSTATIONEN

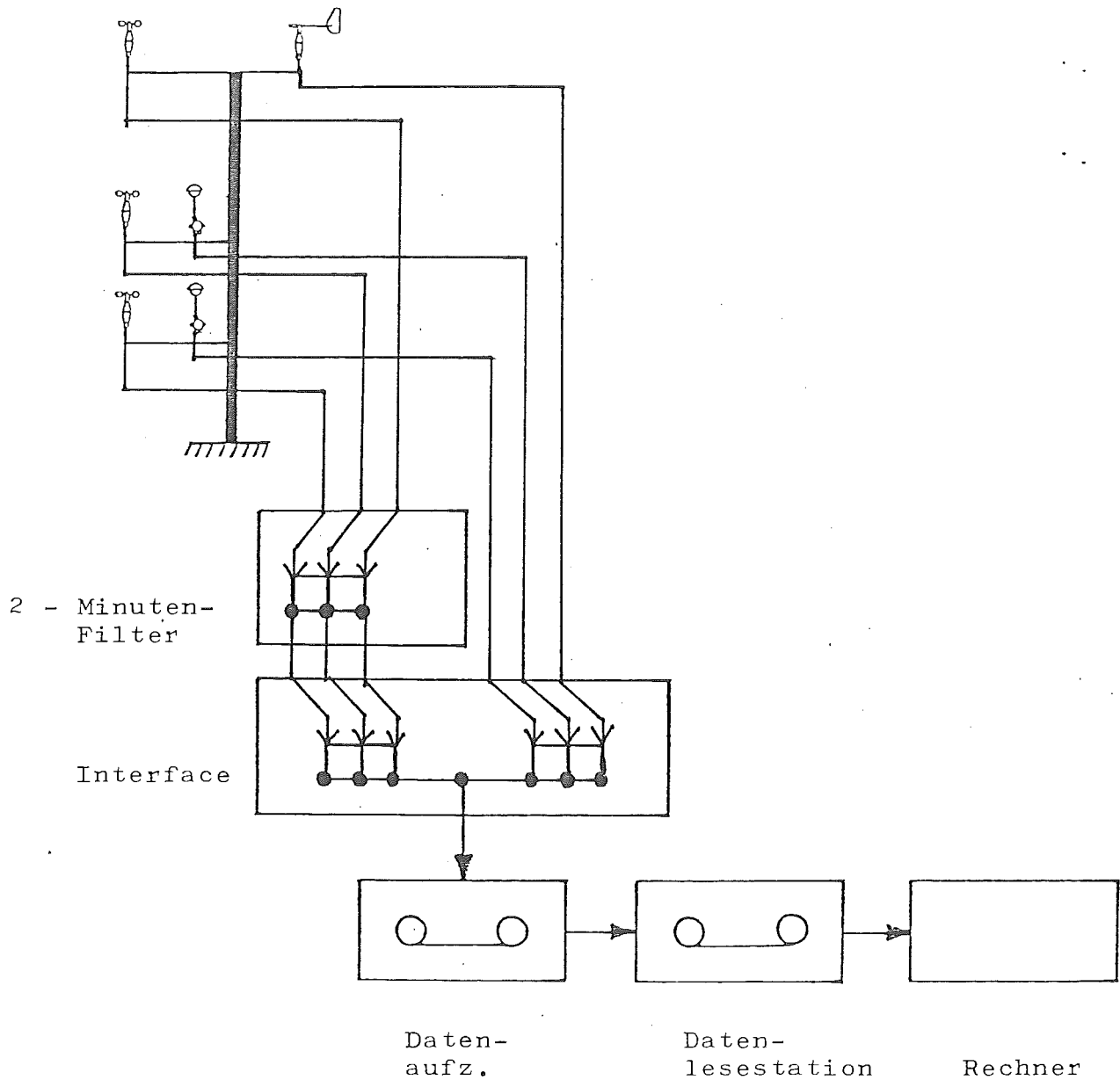


Abbildung 2

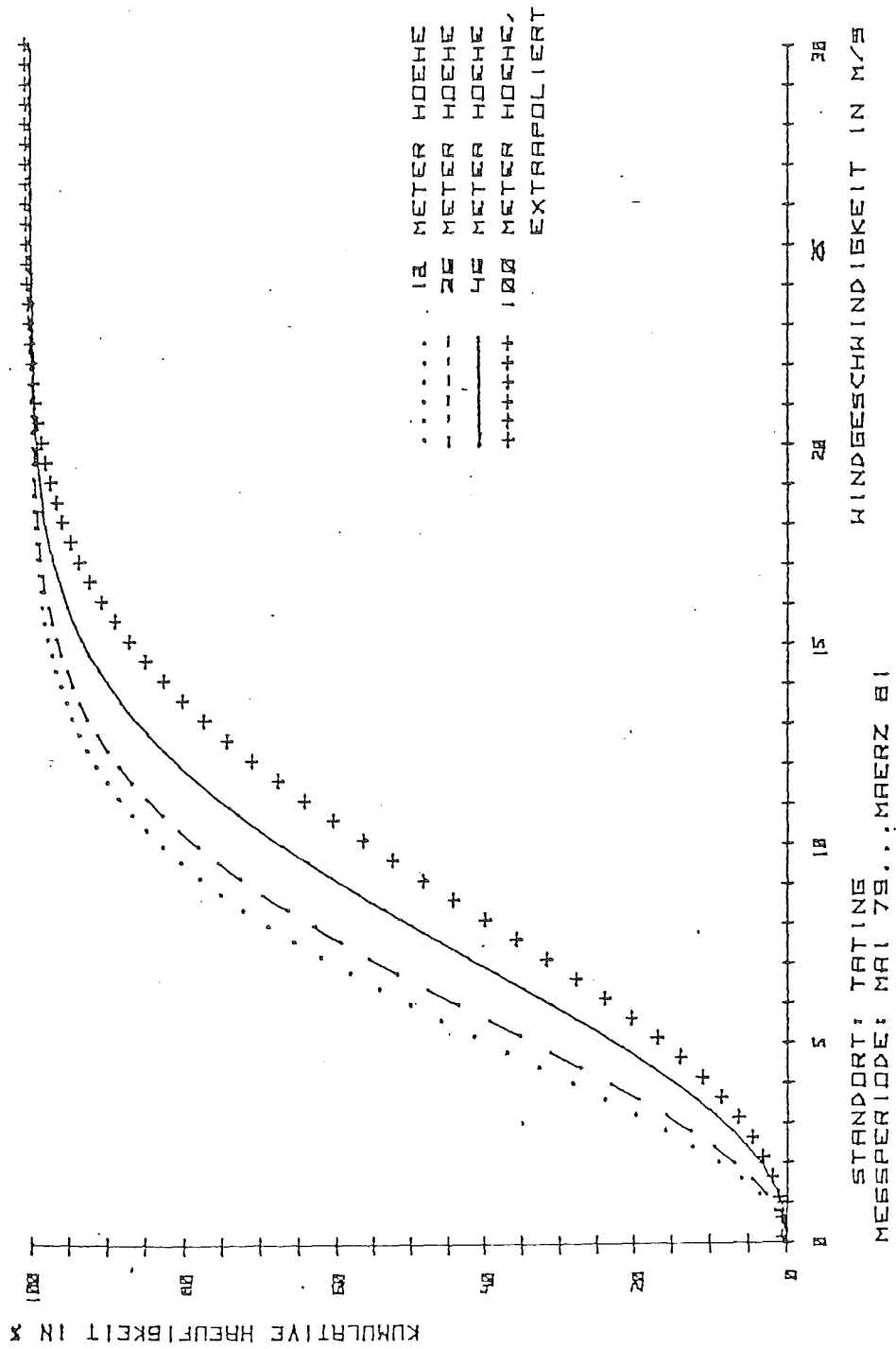


Abbildung 3

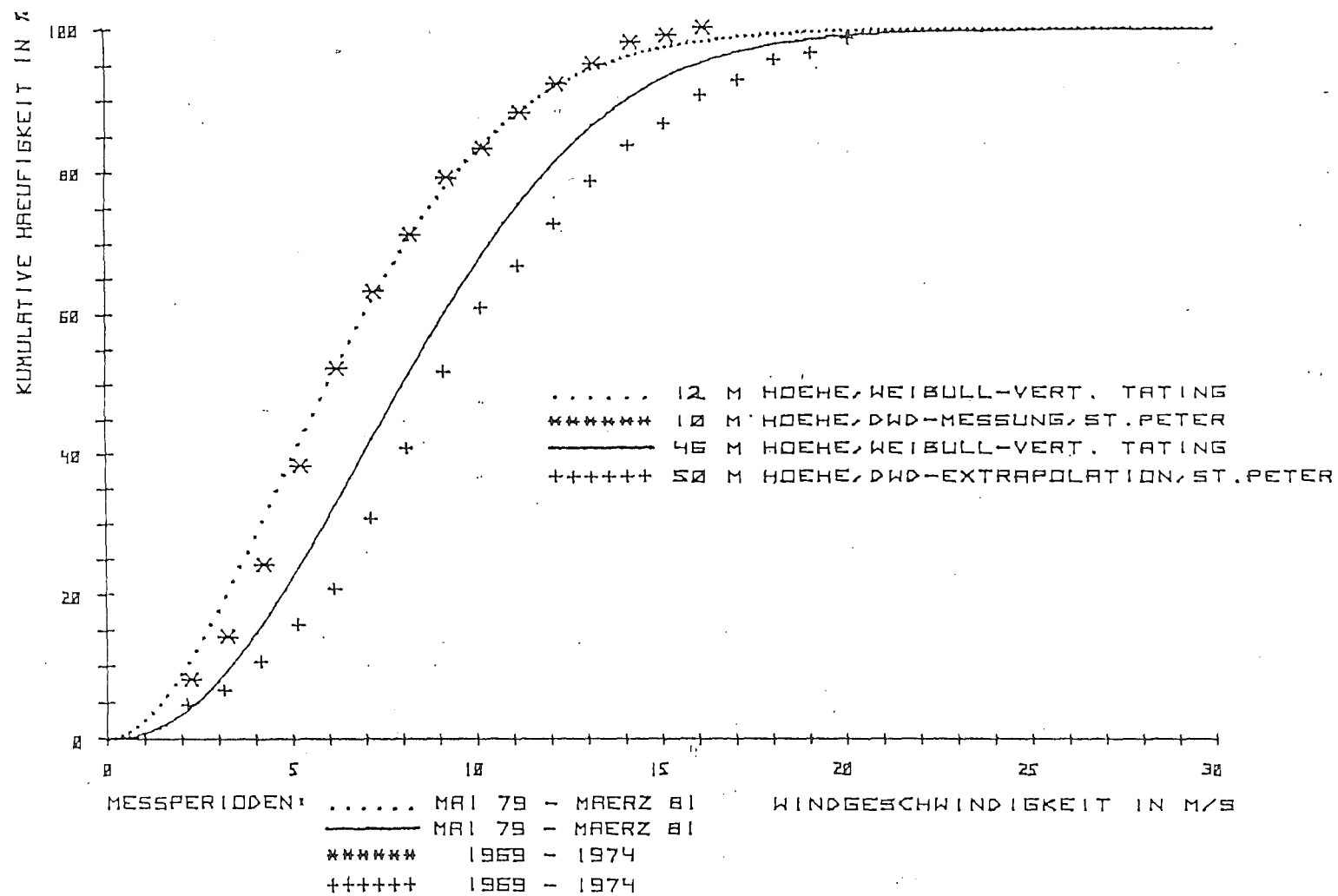


Abbildung 4

Erläuterungen zu Tab. 1

Z:	Meßhöhe in Metern
MIT:	Gemessener Mittelwert der Windgeschwindigkeit in ms^{-1}
MED:	Aus der Weibull-Verteilung berechneter Median in ms^{-1}
MAX:	Aus der Weibull-Verteilung berechneter Modalwert in ms^{-1}
SIG:	Aus den Meßwerten berechnete Standardabweichung in ms^{-1}
VAK:	Variationskoeffizient SIG/MIT (dimensionslos)
D:	Weibull-Parameter (dimensionslos)
A:	Weibull-Parameter (dimensionslos)
SDH:	Schiefte bezogen auf den Median, aus der Weibull-Verteilung berechnet (dimensionslos)
EXC:	Exzeß bezogen auf den Median, aus der Weibull-Verteilung berechnet (dimensionslos)

Tabelle 1

	Z	MIT	MED	MAX	SIG	VAK	C	A	SCH	EXC
MRI 79	12	5.36	4.99	4.08	2.93	0.55	1.90	0.0328	0.030	-2.99
	26	5.92	5.66	5.07	2.84	0.48	2.20	0.0153	0.009	-3.00
	46	7.02	6.78	6.26	3.17	0.45	2.35	0.0077	0.004	-3.00
JUN 79	12	5.17	4.81	4.02	2.75	0.53	1.96	0.0320	0.023	-2.99
	26	5.74	5.46	4.80	2.83	0.49	2.12	0.0190	0.013	-3.00
	46	6.82	6.57	6.01	3.15	0.46	2.30	0.0092	0.006	-3.00
JUL 79	12	7.12	6.90	6.39	3.18	0.45	2.38	0.0070	0.004	-3.00
	26	7.08	6.86	6.36	3.17	0.45	2.38	0.0071	0.004	-3.00
	46	8.47	8.31	8.01	3.39	0.40	2.69	0.0023	0.001	-3.00
AUG 79	12	5.30	4.86	3.77	3.06	0.58	1.79	0.0410	0.045	-2.98
	26	5.60	5.21	4.26	3.07	0.55	1.90	0.0302	0.030	-2.99
	46	7.15	7.53	6.62	3.40	0.48	2.12	0.0095	0.019	-2.99
SEP 79	12	6.19	5.70	4.49	3.53	0.57	1.82	0.0292	0.040	-2.99
	26	6.72	6.31	5.34	3.53	0.53	1.99	0.0178	0.021	-2.99
	46	8.38	8.06	7.35	3.90	0.47	2.28	0.0060	0.006	-3.00
OKT 79	12	6.21	6.01	5.57	2.78	0.45	2.38	0.0097	0.004	-3.00
	26	6.43	6.25	5.84	2.81	0.44	2.44	0.0080	0.003	-3.00
	46	8.68	8.63	8.57	3.04	0.35	3.12	0.0008	0.000	-3.00
NOV 79	12	7.74	7.43	6.71	3.66	0.47	2.24	0.0078	0.008	-3.00
	26	8.35	8.06	7.41	3.80	0.46	2.33	0.0054	0.005	-3.00
	46	9.78	9.54	9.05	4.12	0.42	2.54	0.0023	0.002	-3.00
DEZ 79	12	7.55	7.07	5.92	4.03	0.53	1.96	0.0150	0.023	-2.99
	26	8.40	8.02	7.14	4.08	0.49	2.17	0.0076	0.010	-3.00
	46	9.79	9.50	8.88	4.29	0.44	2.43	0.0029	0.003	-3.00
JAN 80	12	4.54	4.00	2.27	3.17	0.70	1.46	0.0951	0.162	-2.91
	26	4.97	4.39	2.96	3.21	0.65	1.59	0.0660	0.088	-2.96
	46	6.09	5.53	4.15	3.63	0.60	1.73	0.0360	0.055	-2.98
FEB 80	12	6.44	5.89	4.58	3.73	0.58	1.79	0.0290	0.044	-2.98
	26	6.92	6.45	5.34	3.74	0.54	1.93	0.0190	0.026	-2.99
	46	7.51	7.37	7.09	3.03	0.40	2.67	0.0034	0.001	-3.00
MAR 80	12	7.50	7.35	7.04	3.06	0.41	2.63	0.0037	0.001	-3.00
	26	8.20	8.07	7.81	3.23	0.39	2.74	0.0023	0.001	-3.00
	46	10.07	10.00	9.91	3.58	0.36	3.07	0.0006	0.000	-3.00
APR 80	12	6.90	6.21	4.47	4.25	0.62	1.67	0.0329	0.069	-2.97
	26	7.13	6.56	5.18	4.06	0.57	1.82	0.0226	0.040	-2.99
	46	8.47	8.05	7.08	4.20	0.50	2.12	0.0083	0.012	-3.00
MAI 80	12	5.18	4.93	4.35	2.56	0.49	2.13	0.0232	0.012	-3.00
	26	6.02	5.88	5.56	2.64	0.44	2.52	0.0080	0.002	-3.00
	46	7.40	7.25	6.93	3.03	0.41	2.62	0.0039	0.001	-3.00
JUN 80	12	4.63	4.17	3.00	2.85	0.62	1.67	0.0641	0.069	-2.97
	26	5.40	5.00	4.02	3.02	0.56	1.86	0.0348	0.035	-2.99
	46	6.23	5.88	5.03	3.22	0.52	2.03	0.0191	0.018	-3.00
JUL 80	12	5.70	5.28	4.26	3.17	0.56	1.87	0.0309	0.033	-2.99
	26	6.59	6.19	5.24	3.46	0.53	1.99	0.0185	0.021	-2.99
	46	7.77	7.44	6.68	3.72	0.48	2.21	0.0082	0.009	-3.00
AUG 80	12	6.72	6.01	4.23	4.20	0.63	1.64	0.0366	0.076	-2.97
	26	7.45	6.73	4.91	4.54	0.61	1.69	0.0277	0.064	-2.97
	46	8.36	7.70	6.07	4.77	0.57	1.82	0.0169	0.040	-2.99
SEP 80	12	5.61	5.11	3.88	3.31	0.59	1.75	0.0399	0.051	-2.98
	26	6.29	5.86	4.83	3.42	0.54	1.92	0.0233	0.027	-2.99
	46	7.37	6.94	5.91	3.83	0.52	2.01	0.0142	0.020	-2.99
OKT 80	12	7.90	7.52	6.62	3.90	0.49	2.13	0.0095	0.012	-3.00
	26	8.75	8.36	7.48	4.22	0.48	2.19	0.0066	0.009	-3.00
	46	10.18	9.84	9.09	4.59	0.45	2.36	0.0031	0.004	-3.00
NOV 80	12	7.86	7.48	6.59	3.89	0.49	2.13	0.0096	0.012	-3.00
	26	8.62	8.17	7.12	4.33	0.50	2.09	0.0086	0.014	-3.00
	46	10.23	9.91	9.22	4.54	0.44	2.40	0.0038	0.003	-3.00
DEZ 80	12	8.99	8.68	7.99	4.08	0.45	2.34	0.0044	0.005	-3.00
	26	10.03	9.73	9.23	4.21	0.42	2.55	0.0021	0.002	-3.00
	46	11.75	11.52	11.06	4.77	0.41	2.65	0.0011	0.001	-3.00
JAN 81	12	7.16	6.55	5.03	4.18	0.58	1.77	0.0250	0.048	-2.98
	26	7.95	7.44	6.20	4.25	0.54	1.95	0.0139	0.025	-2.99
	46	9.23	8.79	7.79	4.53	0.49	2.15	0.0065	0.011	-3.00
FEB 81	12	6.02	5.59	4.55	3.31	0.55	1.89	0.0368	0.031	-2.99
	26	6.53	6.15	5.25	3.38	0.52	2.02	0.0177	0.019	-3.00
	46	7.81	7.47	6.69	3.75	0.48	2.20	0.0083	0.009	-3.00
MAR 81	12	6.32	5.94	5.03	3.32	0.53	1.99	0.0200	0.021	-2.99
	26	7.12	6.76	5.93	3.55	0.50	2.11	0.0123	0.013	-3.00
	46	8.38	8.04	7.27	3.95	0.47	2.24	0.0065	0.007	-3.00
GESAMT	12	6.51	6.00	4.73	3.72	0.57	1.82	0.0266	0.039	-2.99
	26	7.12	6.64	5.48	3.86	0.54	1.92	0.0183	0.027	-2.99
	46	8.48	8.05	7.11	4.17	0.49	2.14	0.0080	0.011	-3.00

Literatur

- Corotis, Ross B., Sigl, Arden B., Cohen, Michael P.;
1977: Variance analysis of wind characteristics for energy conversion. J. of Appl. Meteorol., Vol. 16, Nr. 2, 1149-1157.
- Duensing, G., Zöllner, R., 1978: Die Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland im Hinblick auf die Nutzung der Windkraft: Teil II: Küstenvorfeld. Ber. d. Deutschen Wetterdienstes, Nr. 147.
- Justus, G.G., Mikhail, Amir, 1976: Height variation of wind speed and wind distribution statistics. Geophys. Res. Letters, 3, 261-264.

Untersuchung zur Nutzung von Windenergie im
Mittelgebirge unter der Berücksichtigung von
vorhandenen Speichermöglichkeiten

Reinhard Trapp, Universität Hannover

I. Ausgangspunkt

Mit diesem Forschungsprojekt soll die Nutzung der Windenergie an einem isolierten Standort im Mittelgebirge untersucht werden. Wegen der exponierten Lage des Standortes - direkt neben dem Oberbecken des Pumpspeicherwerkes Rönkhausen der Fa. ELEKTRO-MARK, Hagen - scheinen dort mit Windenergie und mit einer Möglichkeit zur Speicherung der Windenergie in einem bereits vorhandenen Pumpspeicherwerk besonders günstige Voraussetzungen vorhanden zu sein (Abb.1).

Unzureichende Kenntnisse der Windverhältnisse können jedoch zu Fehlentscheidungen bei der Wahl des optimalen Standortes und der optimalen Windkraftanlage führen. Dies gilt besonders für Standorte in einem stark gegliederten Gelände, wie es die Umgebung des Pumpspeicherwerks ist.

II. Ziele

Das nötige Wissen über das Windfeld soll ein zwei Jahre dauern- des Meßprogramm liefern. Dieser Zeitraum ist ausreichend, um eine Anbindung an langjährige Beobachtungsreihen zu ermöglichen. Dieses Meßprogramm beinhaltet die Messung der

- Windrichtung in 100 m über Grund
- die der Windgeschwindigkeit in 100, 90, 80, 70 und 60 m
- die der Lufttemperatur und die der vertikalen Temperatur-
differenz.

Als Instrumententräger dient ein besteigbarer Gittermast mit quadratischem Grundriß (Abb.2). Alle Daten werden auf Magnetband gespeichert.

Zur Messung der Windgeschwindigkeit in Höhen über 100 m soll zeitweise ein Drachensystem eingesetzt werden. Da es mobil

einsetzbar ist, können aus diesen Messungen Informationen über die Umströmung des Berges gewonnen werden. Das gleiche gilt für Zusatzmessungen mit transportablen 10m- bzw. 17m-Steckmasten.

Ziel der Messungen ist es, eine Häufigkeitsverteilung des mittleren Windenergieangebotes zu erstellen. Hieraus wird dann zunächst die unmittelbar nutzbare Windenergie in Abhängigkeit von der Größe der Windkraftanlage berechnet, bzw. es werden die Anforderungen an eine Windkraftanlage spezifiziert, welche eine optimale Ausnutzung des Windenergieangebotes am vorgesehenen Standort ermöglicht.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen soll eine das Forschungsvorhaben abschließende Projektstudie folgende Fragen untersuchen:

- Ist eine Speicherung von Windenergie in dem am Standort vorhandenen Pumpspeicherwerk wirtschaftlich vertretbar?
- Die gesicherte Leistung einer Windkraftanlage beträgt wegen des schwankenden Windenergieangebotes nur einen Teil ihrer installierten Leistung. Zu untersuchen wäre also; inwieweit läßt sich durch Speicherung die gesicherte Leistung des Windenergiekonverters erhöhen?

III. Stand und bisherige Probleme.

Nachdem die Baugenehmigung zur Errichtung des Mastes bereits im Mai 1979 vorlag, wurde zunächst angenommen, daß Meßprogramm könne noch im selben Jahr beginnen. Da jedoch nach Ansicht des Prüffingenieurs bei der statischen Berechnung des Mastes der Eisansatz nicht genügend berücksichtigt worden war, mußte die Konstruktion des Mastes wesentlich geändert werden.

Ungünstige Witterungsverhältnisse im Winter 79/80 trugen schließlich dann bei, daß der Mast nicht vor Ende Juni 1980 fertiggestellt wurde.

Die Anbringung der Meßwertgeber am Mast und ihre elektrische Verdrahtung erfolgte im Juli 1980. Während des anschließenden Probetriebes wurden noch einige Verbesserungen am Meß- und Datenregistrierungssystem vorgenommen, so daß im August 1980 der normale Meßbetrieb beginnen konnte.

Ende Oktober 1980 fiel das 100m- Anemometer durch eine defekte Lichtschranke aus und zum Jahreswechsel 80/81 gab es einen Totalausfall des Meßsystems infolge einer Überspannung, welche sicherlich durch Blitzeinschlag verursacht wurde. Die gesamte

Meßanlage mußte abgebaut und repariert werden.

Eine vor Wiederanbringung der Meßwertgeber durchgeführte zweite Kalibrierung ergab keine wesentlichen Abweichungen zur ersten.

Seit Mitte März dieses Jahres läuft der Meßbetrieb wieder normal.

Die Speicherung und Verarbeitung der Daten ist inzwischen soweit fortgeschritten, daß der Inhalt der jeweils letzten Bandkassette sofort gelesen, überprüft und auf Magnetband gespeichert wird. Danach werden die Daten decodiert und so aufbereitet, daß für jeden Monat ein Datensatz mit decodierten und überprüften Meßwerten existiert. Diese Daten sind der Daten-Input für verschiedene Auswertungsprogramme.

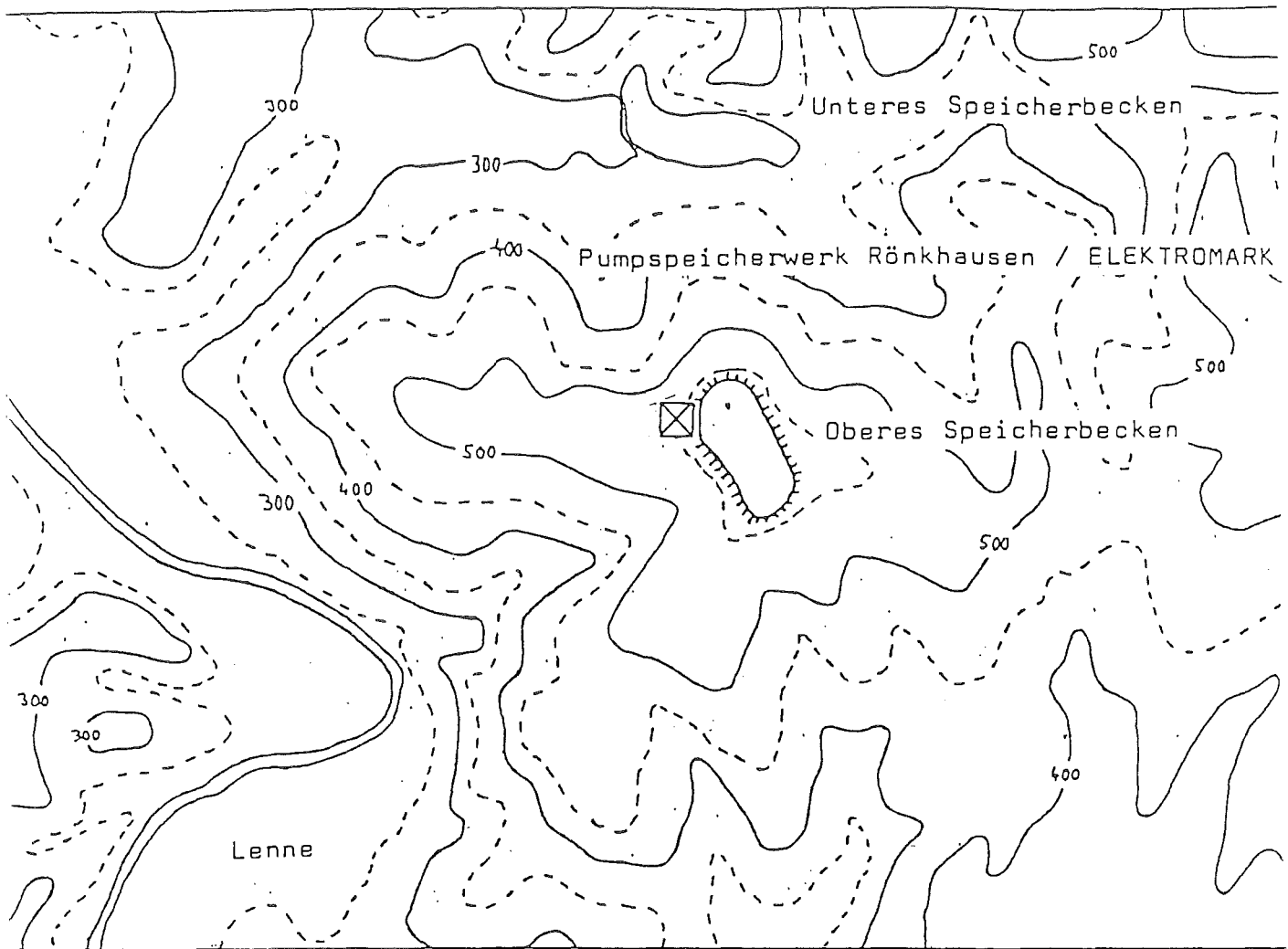
IV. Bisherige Ergebnisse

Das vertikale Windgeschwindigkeitsprofil über komplexem Gelände kann mitunter stark von der sonst in der atmosphärischen Grenzschicht bekannten Form abweichen. Auf diesen Aspekt hin wurden die Messungen vom 10.8.80 bis zum 7.10.80 untersucht, insgesamt 6700 Datensätze. Ein interessantes Ergebnis erbrachte dabei ein Vergleich der Windgeschwindigkeiten in 100 u. in 90 m Höhe (Abb.3,4,5).

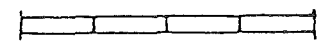
Bei Windrichtungen zwischen 310° und 340° häufen sich die Fälle, bei denen die Windgeschwindigkeit in 90m Höhe größer ist als die in 100m. Schaut man sich daraufhin das Geländeprofil um den Mast an, so findet man gerade hier den steilsten Anstieg des Geländes in Richtung auf den Mast (Abb.6).

Die durch den Taleinschnitt auf den Mast zuströmende Luft erfährt offensichtlich in 90m Höhe ihre größte Beschleunigung.

Abschließend sollen für den Monat Sept. 80 die Monatsmittelergebnisse der Windgeschwindigkeit zweier Standorte in Norddeutschland mit dem im Sauerland verglichen werden. Wie aus Tab.1 ersichtlich sind die Standorte Rönkhausen und Stade durchaus vergleichbar. Wegen der geringen Entfernung zur Küste weist der Standort Tating jedoch wesentlich höhere Windgeschwindigkeiten auf.



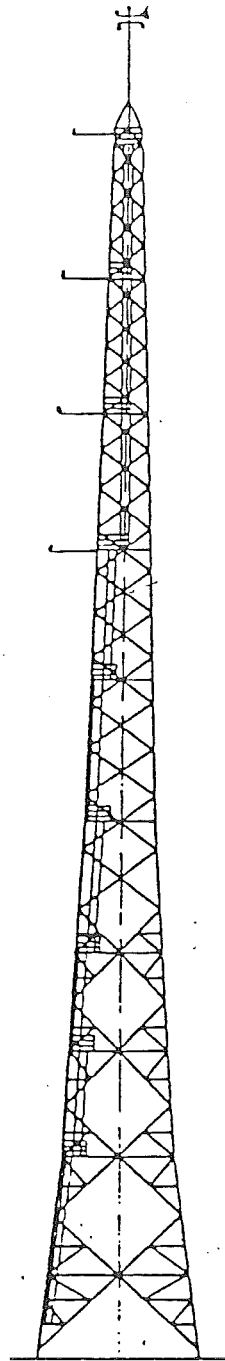
Maßstab 1 : 25000



0 500 1000 m

Topographie in der unmittelbaren
Umgebung des Standortes Rönkhausen

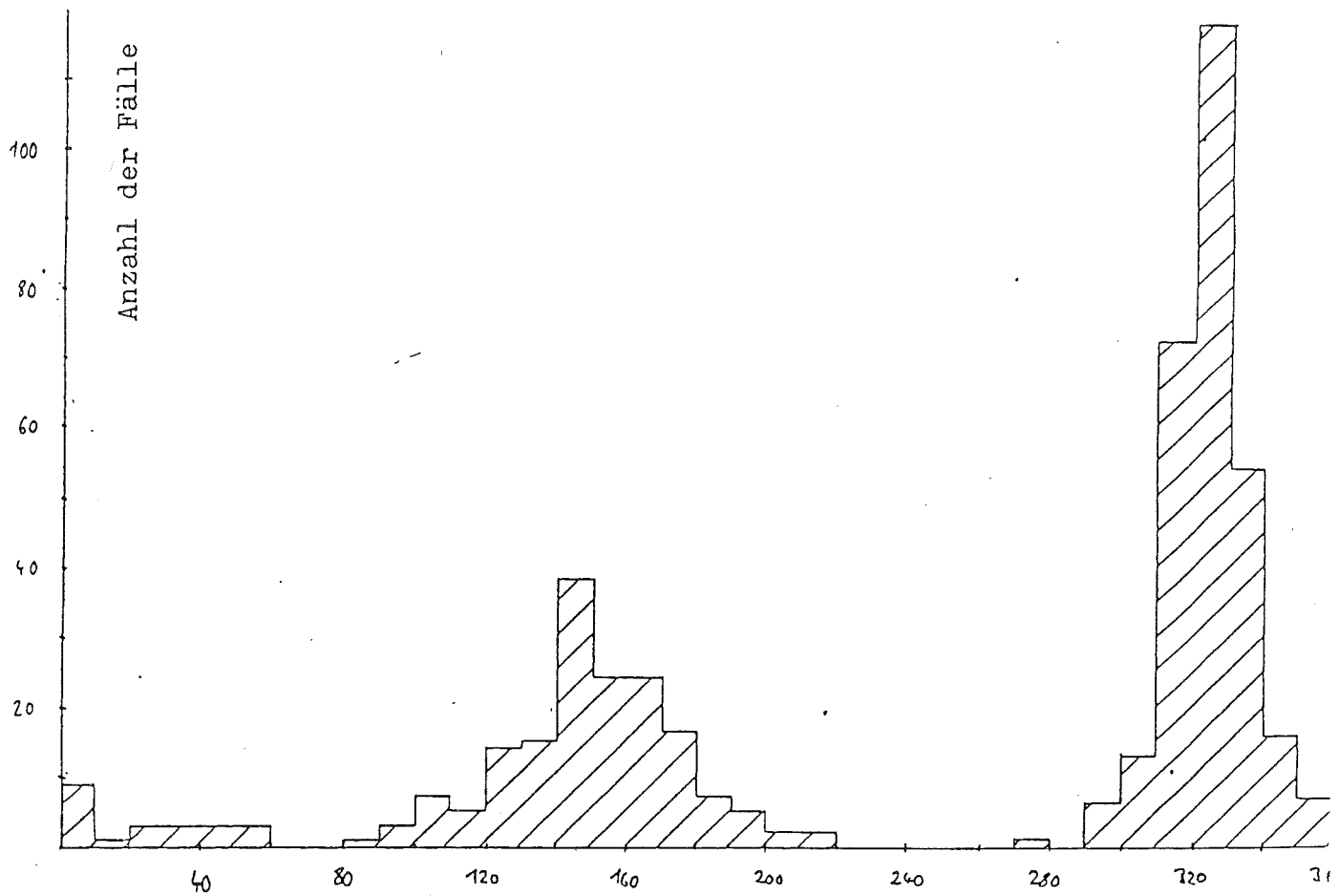
(Abb.1)



Windmeßturm,
Gesamthöhe 100 m

(Abb.2)

Statistik der Windrichtungen mit $V_{100} < V_{90}$
(10.8.-7.10.1980)



Windrichtung in °

(Abb.3)

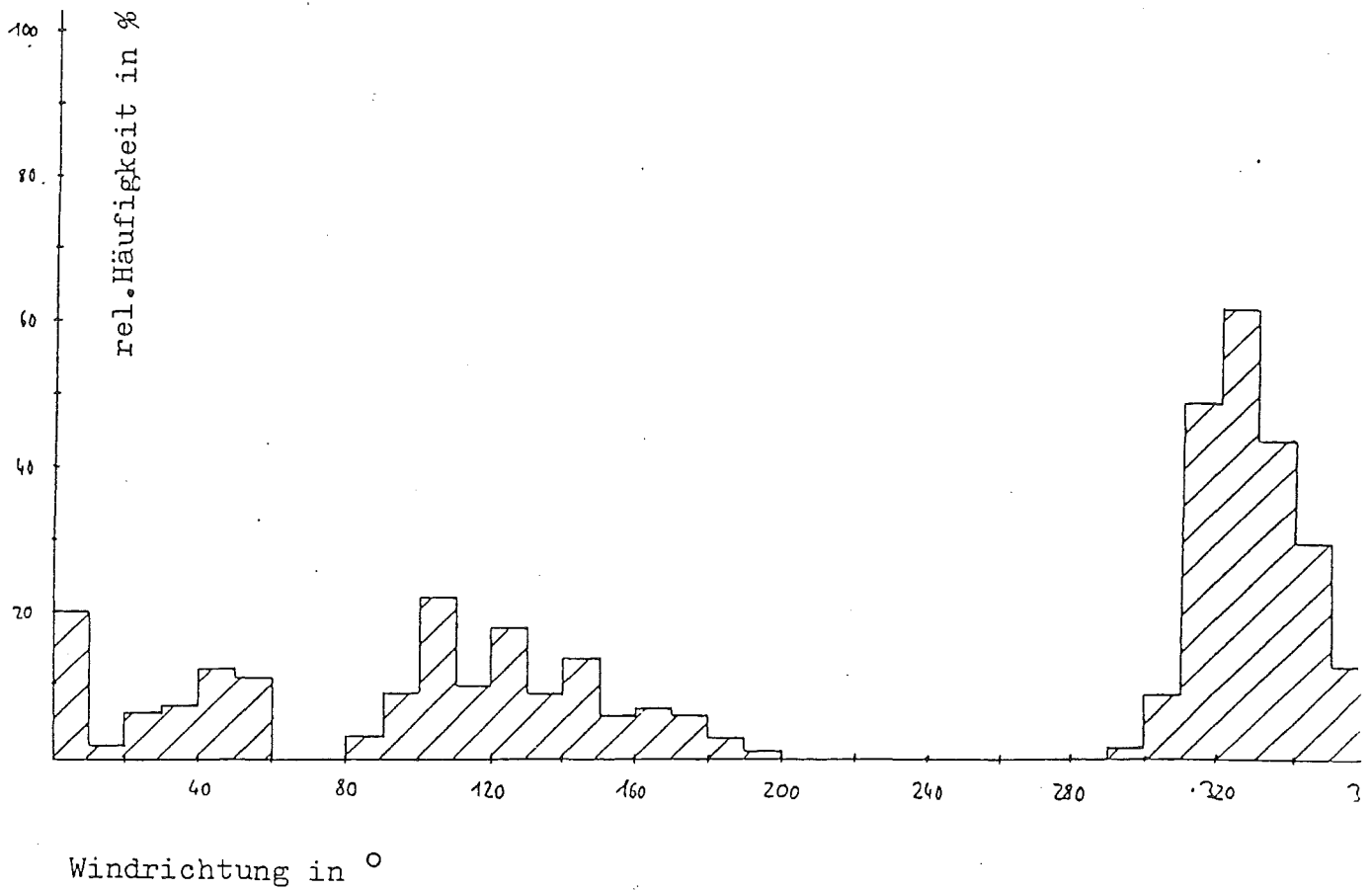
Absolute Häufigkeit der Fälle mit $V_{100} < V_{90}$

Gesamtzahl der Messungen: 6715

Zahl der Mess. mit $V_{100} < V_{90}$: 471

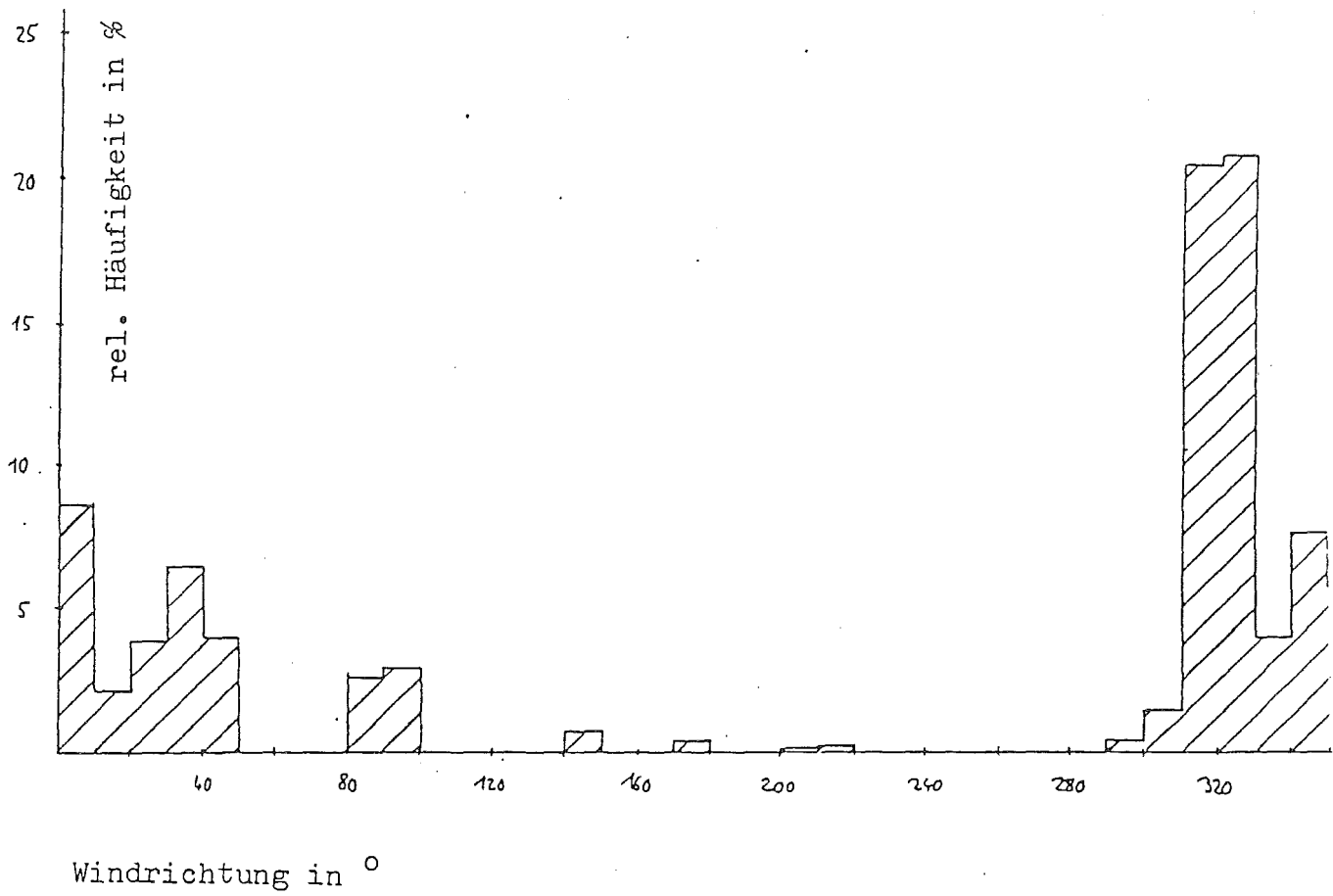
rel. Häufigkeit: 7.0%.

Relative Häufigkeit der Windrichtungen mit $V_{100} < V_{90}$

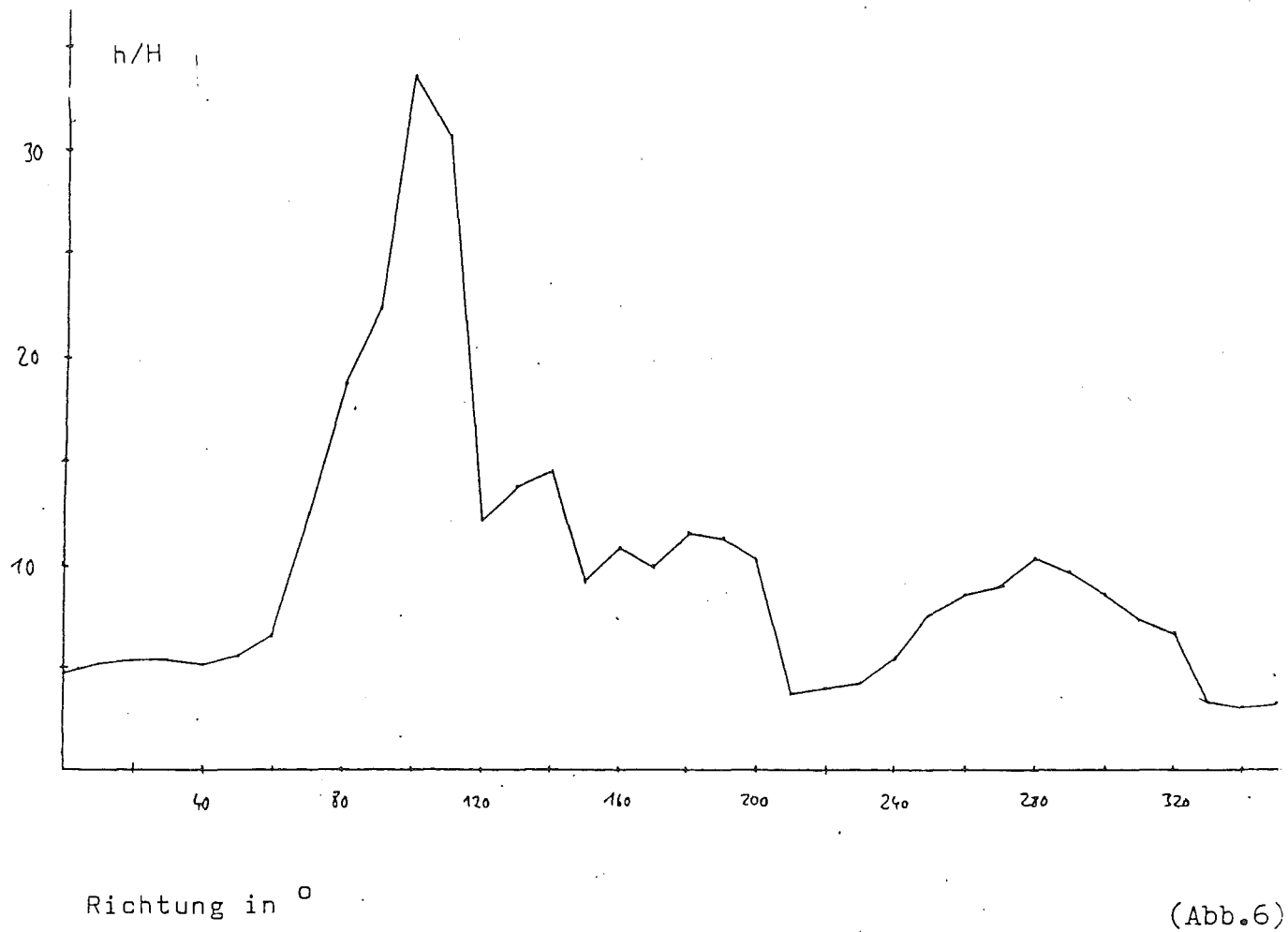


(Abb.4)

Relative Häufigkeit der Messungen, bei denen
 V_{90} um 10% größer als V_{100} ist



(Abb.5)



Mittlerer Anstieg der Topographie

(Mast: Ursprung des Koordinatensystems)

h : Horizontaldistanz H : Höhendifferenz

Die Windverhältnisse im Binnenland der
Bundesrepublik Deutschland im Hinblick auf
die Windkraftnutzung (insbesondere Verbundnetzplanungen)

Günter Jurksch, Deutscher Wetterdienst

Das Forschungsprojekt ET 1414 A steht in direktem Zusammenhang mit dem Projekt ET 1413 A, das im Deutschen Wetterdienst, Seewetteramt Hamburg, bearbeitet wird. Beide Projekte stellen praktisch eine Ergänzung der Windkraftstudie dar, die als Bericht des Deutschen Wetterdienstes Nr. 147 bereits publiziert ist.

Wesentlicher Bestandteil dieses Berichtes ist die Zonenkarte, die innerhalb der Bundesrepublik Deutschland Gebiete abgrenzt, die für eine Windkraftnutzung unterschiedliche Eignung besitzen (Zone I: günstig; Zone II: bedingt geeignet; Zone III: ungünstig) (Abb. 1).

Auf dieser Karte sowie auf dem Datenmaterial von ca. 60 ausgewählten Stationen des Deutschen Wetterdienstes baut die Folgeuntersuchung auf und befaßt sich zunächst mit mittleren relativen Häufigkeitsverteilungen bestimmter windgeschwindigkeitsgrenzwerten wie $<3, \geq 5, \geq 8, \geq 12$ m/s in ihrem Jahres- und Tagesgang sowie mit der Andauer von Flautenperioden ohne Unterbrechungen.

Die Korrelation der Flautendauern von mindestens 6, 12 und 24 Stunden mit den Großwetterlagen nach MEISS / BREZOWSKY zeigt jedoch, daß:

- 1) Flauten zwar bei bestimmten Großwetterlagen (wie Hochdruckbrücken über Mitteleuropa sowie Hochdruckgebieten über Mitteleuropa) im mittleren und nördlichen Deutschland bevorzugt auftreten,
- 2) im süddeutschen Raum unter Einflüssen von Kontinentalität und Geländere relief, länger anhaltende Flauten auch bei zyklonalen Westlagen zu erwarten sind, die beispielsweise im Küstenbereich für die Windkraftnutzung noch günstige Ergebnisse erwarten lassen.

Da selbst Einzelwetterlagen vom gleichen Zirkulationstyp in ihrem Ablauf größeren Variationen unterliegen und die verfügbaren Zeitreihen noch nicht ausreichend lang sind, ist es nicht möglich, die raum-zeitliche Verlagerung der Flautenfelder (aber auch der Starkwind- und Sturmfelder) über das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland hinweg eindeutig und zugbahnähnlich darzustellen.

Daraus folgt u.a., daß das recht einfache und aktuelle Erkennen einer Großwetterlage allein keine hinreichende Vorhersage von Flauten- oder Starkwindfeldern zuläßt, d.h. der praktische Betriebsablauf der Windkraftnutzung bleibt an spezielle, synoptische Beratungen gebunden, wie sie der Deutsche Wetterdienst routinemäßig abgibt.

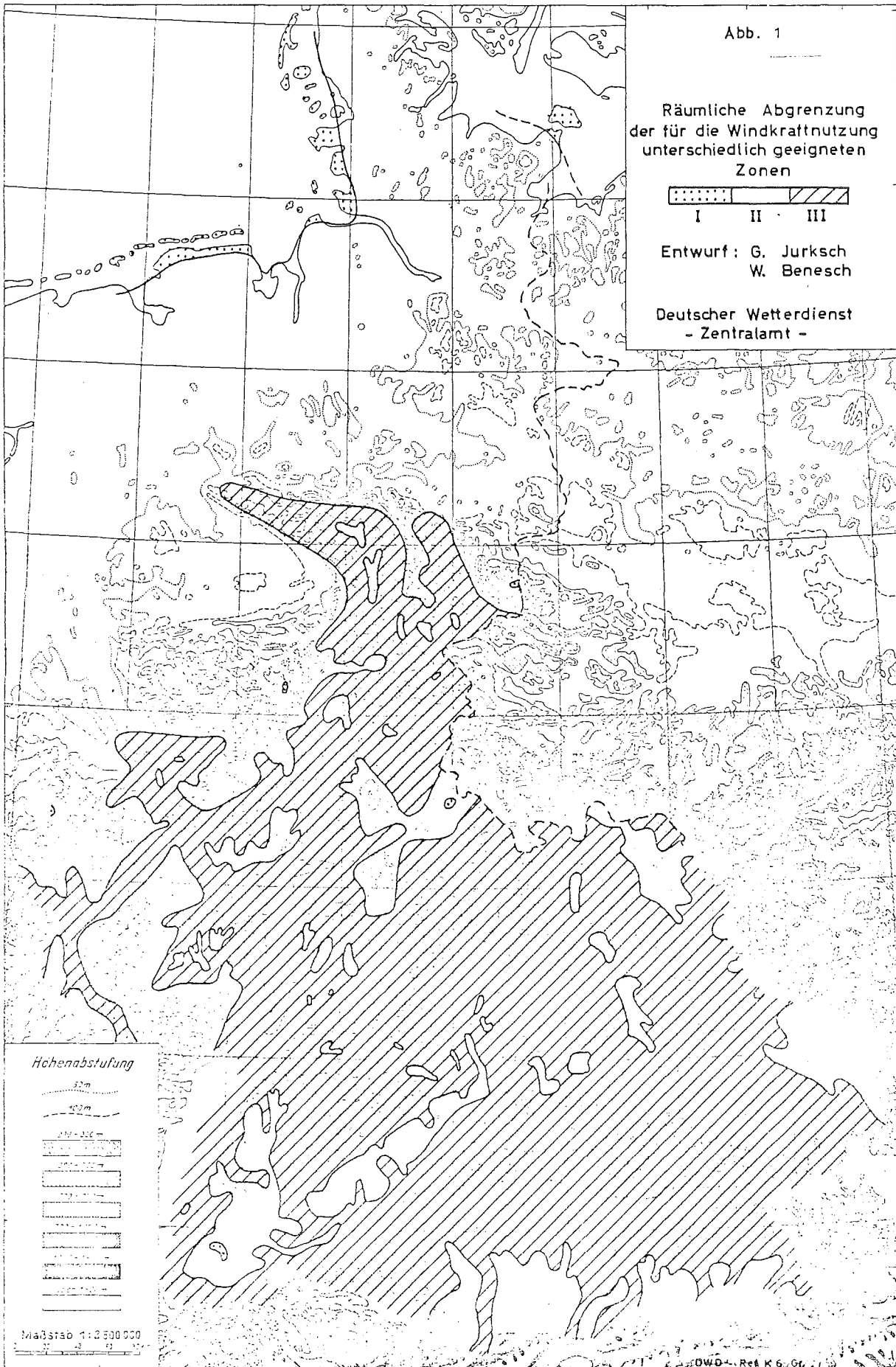
Diese Zusammenhänge werden auch in den eigentlichen meteorologischen Verbundnetzuntersuchungen erkennbar, wobei - ausgehend von ausgewählten Basisstationen - das gleichzeitige Auftreten bestimmter, festgelegter Windgeschwindigkeitsklassen an anderen zugeordneten Stationen als mittlere jährliche Häufigkeitsverteilung dargestellt wird. Es wurde sowohl der Zweier- als auch Dreierverbund berücksichtigt. Als Muster für den Zweierverbund wurde Tab. 1 ausgewählt:

Basisstation ist Hannover innerhalb der Zone II; sie wird 11 Sekundärstationen gegenübergestellt, wobei die jeweiligen Windgeschwindigkeitsverteilungen in 5 Klassen zusammengefaßt werden. B 1 steht somit für die 1. Klasse der Windgeschwindigkeit an der Basisstation; S 1 repräsentiert die 1. Klasse (Flauten) der Sekundärstation. Die Kombination "B 1 S 1" bedeutet somit gleichzeitiges Auftreten von Flauten an Basis- und Sekundärstation, "B 5 S 5" gleichzeitiges Auftreten von Windgeschwindigkeiten ≥ 12 m/s an Basis- und Sekundärstation. In der linksseitigen Ordinate sind mit den Buchstaben C bis M die unterschiedlichen Sekundärstationen angegeben, in den zugehörigen Zeilen jeweils die Klassenkombinationen. So tritt als Beispiel die für Verbundplanungen sehr interessante Klasse "B 5 S 5" im Verbund Hannover / Kahler Asten bzw. Hannover, Feldberg lediglich an 2 % aller Jahresstunden auf, d.h. an durchschnittlich rund 18 Stunden pro Jahr sind an diesen Stationspaaren Sturmfelder mit Windgeschwindigkeiten ≥ 12 m/s jeweils gleichzeitig zu erwarten. An den übrigen Sekundärstationen, die bereits nicht mehr innerhalb der Zone I liegen, wird dieser bescheidene Häufigkeitsanteil im Mittel schon nicht mehr erreicht. Auf andere Klassenkombinationen wird aus Zeitgründen nicht mehr eingegangen; sie werden im Abschlußbericht interpretiert.

Ähnliche Ergebnisse werden auch im Dreierverbund erzielt (Tab. 2). Eine Kombination "A 5 B 5 C 5" ist beispielsweise zwischen dem Stationstripel Hannover/Kahler Asten/Hof-Hohensaas nur an durchschnittlich 1 % aller Jahresstunden (≈ 8 bis 9 Stunden) zu erwarten.

Zu sehr ähnlichen Aussagen gelangt man auch bei Betrachtung anderer, ausgewählter Stationsgruppen.

Im Vorgriff auf die Ergebnisse des Abschlußberichtes ist zu bemerken: im Binnenland ist aus meteorologischer Sicht der Betrieb von Windkraftanlagen im Verbund äußerst problematisch. Dieser Aussage kommt Allgemeingültigkeit zu, selbst wenn die Untersuchung zunächst nur auf Windgeschwindigkeitswerte zurückgreift, die aus einer Bezugshöhe von 10 (bis etwa 20) m über Grund stammen.



Tab.1 HAEUFIGKEITSVERTEILUNG VON WINDGESCHWINDIGKEITEN, DIE AN 2 STATIONEN ZUR GLEICHEN ZEIT AUFTRETEN

BASISSTATION (R) : HANNOVER

SEKUNDAERSTATIONEN (S) :

C: KAHLER ASTEN
D: HUELSDORF/IIH
E: FELDBERG (SCHWARZWALD)
F: MEMMINGEN
G: HOF
H: HUERNBERG
I: WEISSENBURG
J: MUENCHEN
K: AUGSBURG
L: KEMPTEN
M: GARMISCH - PATENKIRCHEN

KLASSEN DER WINDGESCHWINDIGKEIT:

1. KLASSE (1) : 0.0 - 2.9 M/SEC
2. KLASSE (2) : 3.0 - 4.9 M/SEC
3. KLASSE (3) : 5.0 - 7.9 M/SEC
4. KLASSE (4) : 8.0 - 11.9 M/SEC
5. KLASSE (5) : >= 12.0 M/SEC

MITTLERE JAEHRLICHE HAEUFIGKEITEN DES ZEITRAUMS 1969 (I) BIS 1974 (XII)
(MITTLERE ANZAHL DER STUNDEN)

KOMBINATION DER WINDGESCHWINDIGKEITSKLASSEN VON BASISSTATION UND JEWELIGER SEKUNDAERSTATION

	B1S1	B1S2	B1S3	B1S4	B1S5	B2S1	B2S2	B2S3	B2S4	B2S5	B3S1	B3S2	B3S3	B3S4	B3S5	B4S1	B4S2	B4S3	B4S4	B4S5	B5S1	B5S2	B5S3	B5S4	B5S5
C	689	1396	997	90	2	245	840	1413	310	6	49	289	1108	708	51	2	14	124	320	87	0	0	0	8	15
D	2785	313	70	5	0	2245	444	112	14	0	1454	551	176	24	0	223	199	109	16	0	4	6	11	3	0
E	691	521	750	734	476	546	437	678	677	477	334	286	437	533	615	41	38	71	128	268	1	0	1	3	19
F	2066	735	323	44	6	1563	754	409	81	8	820	642	538	186	19	77	138	187	120	25	0	3	5	9	7
G	2175	794	189	16	0	1197	1102	465	50	1	347	815	878	161	4	16	80	256	185	9	0	0	3	12	8
H	2666	418	82	7	1	1930	681	186	18	1	968	763	408	64	2	90	168	207	79	3	1	3	7	10	3
I	2630	429	98	16	1	1940	648	190	36	1	948	778	410	68	2	80	177	220	68	3	1	2	8	10	3
J	2303	639	192	35	5	1735	723	295	57	4	942	678	442	128	15	102	147	177	103	19	1	2	6	8	7
K	2376	627	155	15	0	1791	750	246	27	0	979	725	430	69	1	106	166	213	59	3	1	3	8	10	2
L	2931	207	33	3	0	2424	335	55	2	0	1559	508	130	8	0	253	193	95	6	0	3	6	11	4	0
M	2999	171	4	0	0	2577	232	6	0	0	2002	198	6	0	0	486	56	4	0	0	15	8	0	0	0

RELATIVE JAEHRLICHE HAEUFIGKEITEN (IN PROMILLE) DES ZEITRAUMS 1969 (I) BIS 1974 (XII)

KOMBINATION DER WINDGESCHWINDIGKEITSKLASSEN VON BASISSTATION UND JEWELIGER SEKUNDAERSTATION

	B1S1	B1S2	B1S3	B1S4	B1S5	B2S1	B2S2	B2S3	B2S4	B2S5	B3S1	B3S2	B3S3	B3S4	B3S5	B4S1	B4S2	B4S3	B4S4	B4S5	B5S1	B5S2	B5S3	B5S4	B5S5
C	79	159	114	10	0	28	96	161	35	1	6	33	126	81	6	0	2	14	36	10	0	0	0	1	2
D	318	36	8	1	0	256	51	13	2	0	166	63	20	3	0	25	23	12	2	0	0	1	1	0	0
E	79	60	86	84	54	62	50	77	77	54	38	33	50	61	70	5	4	8	15	31	0	0	0	0	2
F	236	84	37	5	1	170	86	47	9	1	94	73	61	21	2	9	16	21	14	3	0	0	1	1	1
G	248	91	22	2	0	137	126	53	6	0	40	93	100	18	0	2	9	29	21	1	0	0	0	1	1
H	304	48	9	1	0	220	70	21	2	0	110	87	47	7	0	10	19	24	9	0	0	0	1	1	0
I	300	49	11	2	0	221	74	22	4	0	108	89	47	8	0	9	20	25	8	0	0	0	1	1	0
J	263	73	22	4	1	190	83	34	7	0	107	77	50	15	2	12	17	20	12	2	0	0	1	1	1
K	271	72	18	2	0	204	86	20	3	0	112	83	49	8	0	12	19	24	7	0	0	0	1	1	0
L	334	24	4	0	0	277	38	6	0	0	178	58	15	1	0	29	22	11	1	0	0	1	1	0	0
M	342	20	0	0	0	294	27	1	0	0	228	23	1	0	0	55	6	0	0	0	2	1	0	0	0

ENTFE = DIE ENTFERNUNG (KM) ZWISCHEN BASIS- UND SEKUNDAERSTATION

Die Windverhältnisse im Küstenvorfeld der
Bundesrepublik Deutschland im Hinblick auf die
Windkraftnutzung (insbesondere Verbundnetzplanung)

G. Duensing, H. Schmidt, Deutscher Wetterdienst

Die Windkraftstudie des Deutschen Wetterdienstes gliedert sich in zwei Teile:

- 1) Verbundnetzangelegenheiten
- 2) kleinräumige orographische Einflüsse auf das Windfeld.

Der vorliegende Vortrag bezieht sich im wesentlichen auf Teilaspekte der Verbundnetzplanung, Ergebnisse des zweiten Teilbereiches werden gelegentlich zur Erläuterung verwendet.

Für die Jahre 1972 bis 1977 wurden die Windregistrierungen aller im küstennahen Bereich der norddeutschen Tiefebene verfügbaren Standard-Meßeinrichtungen in verschiedenen Projekten aufbereitet. Zur Zeit stehen etwa 45 Zeitserien des Windes mit je einem Zehnminuten-Mittelwert pro Stunde aus den genannten 6 Jahren zur Verfügung. Die räumliche Verteilung der Stationen zeigt Abbildung 1. Acht dieser Stationen wurden zu Basis-Stationen erklärt um eine gewisse Überschneidung mit dem Binnenland-Teil dieser Studie zu gewährleisten.

Für alle Stationen werden eindimensionale Häufigkeitsverteilungen des Windes, für die Basis-Stationen auch 2- und 3-dimensionale kombinierte Verteilungen in tabellarischer Form erstellt, wie für den Binnenland-Teil bereits erläutert. Darüberhinaus werden hier graphische Darstellungen (Leistungsdiagramme) für Einzelstationen und Verbundbetriebe von 3 Windkraftwerken beigelegt, die ein weniger detailliertes, dafür aber wesentlich anschaulicheres Bild des Leistungsangebotes

vermitteln (Abbildung 2 und 3).

Dargestellt sind die zeitlichen Anteile der verschiedenen Leistungsstufen, die sich wegen der Proportionalität der Leistung zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit ergeben. Die Breite jeder Treppenstufe gibt den zeitlichen Anteil in Prozent, die absolute (Gesamt-) höhe der Stufen die zugehörige Leistung in Prozent der Nennleistung der Windenergiekonverter. Die Fläche unterhalb der Treppenkurve stellt die mittlere relative Leistung in Bezugszeitraum dar. Sie wird als Effizienz (EFF) bezeichnet und in Prozent der Gesamtfläche (das ist die maximal denkbare Leistung, nämlich 100 % der Nennleistung in 100 % des Bezugszeitraumes) angegeben.

Wir sind hier von idealisierten Windenergiekonvertern ausgegangen, die unterhalb der Anlaufschwelle keine Energie erzeugen, zwischen der Anlaufschwelle und der Volllastschwelle mit konstantem Wirkungsgrad arbeiten. Ab der Volllastschwelle wird bis 25 m/s konstante Leistung (Nennleistung) abgegeben, darüberhinaus wiederum keine Energie erzeugt (Segelstellung). Wir unterscheiden hier zwei Typen, die wir mit den Anlauf-, Volllast- und Abschaltsschwellen bezeichnen: Typ 3 12 25 und Typ 5 15 25, die ungefähr die Growiantypen I und II mit ca. 3 bzw. 5 MW Nennleistung vertreten.

Die Abbildung 2 zeigt die Leistungsdiagramme für Standort List/Sylt und 10 m Bezugshöhe, Abbildung 3 die Leistungsdiagramme eines Verbundbetriebes mit den Standorten Westermarkelsdorf/Fehmarn, List/Sylt und Bremerhaven für eine Bezugshöhe von 100 m. Die höhere Effizienz des Typs 3 12 25 beruht größtenteils darauf, daß die Volllastschwelle von 12 m/s wesentlich häufiger erreicht wird als 15 m/s bei dem zweiten Typ. Einen geringen Beitrag liefert auch die niedrigere Anlaufschwelle von 3 m/s. Dabei ist aber zu bedenken, daß eine höhere Volllastschwelle auch i.a. eine höhere Nennleistung bedeutet. Die

größere Höhe bringt eine erhöhte Effizienz, da der Wind mit der Höhe zunimmt. Das Extrapolationsverfahren wird weiter unten beschrieben.

Der Verbundbetrieb dagegen bringt keine Leistungszunahme (die Leistung des Verbundes ist die Summe der Einzelleistungen der Konverter), aber eine verbesserte zeitliche Verteilung der Leistung. Die starke Krümmung der Leistungskurven (Abbildung 2) wird abgemildert, das bedeutet eine etwas gleichmäßigere Verteilung der Leistung, die mittlere Leistungsabgabe erhöht sich zugunsten der maximalen Leistungsabgabe. Je weiter die beteiligten Kraftwerke voneinander entfernt stehen, desto günstiger das Ergebnis in dieser Beziehung. Es muß jedoch betont werden, daß ein Verbund, der ausschließlich in Norddeutschland betrieben wird, keine wesentliche ausgleichende Wirkung besitzen wird, da die Windverhältnisse weitgehend homogen sind.

Die Abbildungen 4 und 5 geben die räumliche Verteilung der Effizienz für Einzelbetrieb an den Basisstationen sowie 3fach-Verbundbetriebe an benachbarten Basisstationen (in der Mitte der Dreiecke). Die Bezugshöhe ist 100 m. Für bei Typen von Windenergiekonvertern zeigt sich, daß die Effizienz abnimmt, sobald Landstationen beteiligt sind. Hier wird deutlich, wie sehr die größere Rauigkeit des Landes das Windangebot (gegenüber der See) vermindert.

Im Bericht zum Binnenland-Teil dieser Studie wurde gezeigt, daß eine Extrapolation auf größere Höhen auf fast unüberwindliche Schwierigkeiten stößt. Auf See liegen die Verhältnisse wegen der homogenen (und geringen) Rauigkeit etwas einfacher, doch liegt selbst hier die Hauptschwierigkeit darin, daß uns keine Zeitserien der Stabilitätsverhältnisse der Luftschichtung vorliegen. Daher wurde zunächst die Schichtung völlig vernachlässigt (um zumindest eine grobe Abschätzung zu geben) und ein Potenzprofil in einfachster Form (Exponent $0.14 = 1/7$)

für See- und Inselstationen verwendet. Selbst für Inselstationen kann dieser Exponent schon zu niedrig sein. Für die Landstationen Jagel und Bremerhaven ergeben sich dabei sicher zu niedrige Werte. Daher wurde für diese als obere Schätzgrenze mit einem Koeffizienten von $0.25 = 1/4$ nochmals gerechnet (Werte der Effizienz geklammert).

In anderen Untersuchungen mit den hier gezeigten Stationen hat sich gezeigt, daß entscheidende Kenntnisse fehlen, um genauere Extrapolationsmethoden anwenden zu können, da die (kleinräumigen) lokalen Umgebungseinflüsse des jeweiligen Aufstellungsortes der Windmesser (außer bei „idealer“ Aufstellung, die aber fast nirgends gegeben ist) eine erhebliche Unsicherheit erzeugen. Als extremes Beispiel möge hier die Station List/Sylt dienen, die auf einer 30 m hohen, steilen Düne liegt. Die Abbildung 6 zeigt einige Windprofile, die bei nordwestlicher Anströmung in diesem Projekt (Teil 2) aufgezeichnet wurden. Die beiden unteren Meßpunkte entstammen einem mobilen Mast, der in dem ca. 1 km breiten vorgelagerten Dünentale stand. Die anderen Werte wurden an Masten auf der Düne aufgezeichnet. Es zeigt sich, daß alle Windwerte sich zu „vernünftigen“ Profilen reihen, so als wäre die Düne in 1. Näherung ein Mast von 30 m Höhe.

Wäre dieser Tatbestand für alle Anströmungsrichtungen erfüllt, würde das für den Windmesser der Wetterstation, der 12 m über der Düne und ca. 40 m über der Talsohle angeordnet ist, eine mittlere Überhöhung der Windwerte um ca. 30 % (!) bedeuten. Tatsächlich sind die Verhältnisse nicht so einfach und die Überhöhung wird etwa 10 - 30 % betragen. Um diese Größenordnung sind auch die auf 100 m Höhe extrapolierten Werte zu hoch.

Ähnlich liegen die Verhältnisse an der Station Norderney. Es läßt sich also sagen, daß die angegebenen Werte der Effizienz für die Deutsche Bucht jedenfalls das Maximum des Möglichen

darstellen. Auch sind Methoden zur Extrapolation von Böenstatistiken in größere Höhen nur in Ansätzen verfügbar.

Deshalb ist geplant, durch Messungen an Masten und mit Hilfe eines SODAR-Gerätes voraussichtlich am Eidersperrwerk die Windcharakteristiken und (soweit möglich) Extrapolationsverfahren für den unmittelbaren Küstenbereich bis in Höhen von 250 m detailliert zu untersuchen. Hierüber wird gesondert vorgetragen.

Räumliche Verteilung
der Stationen

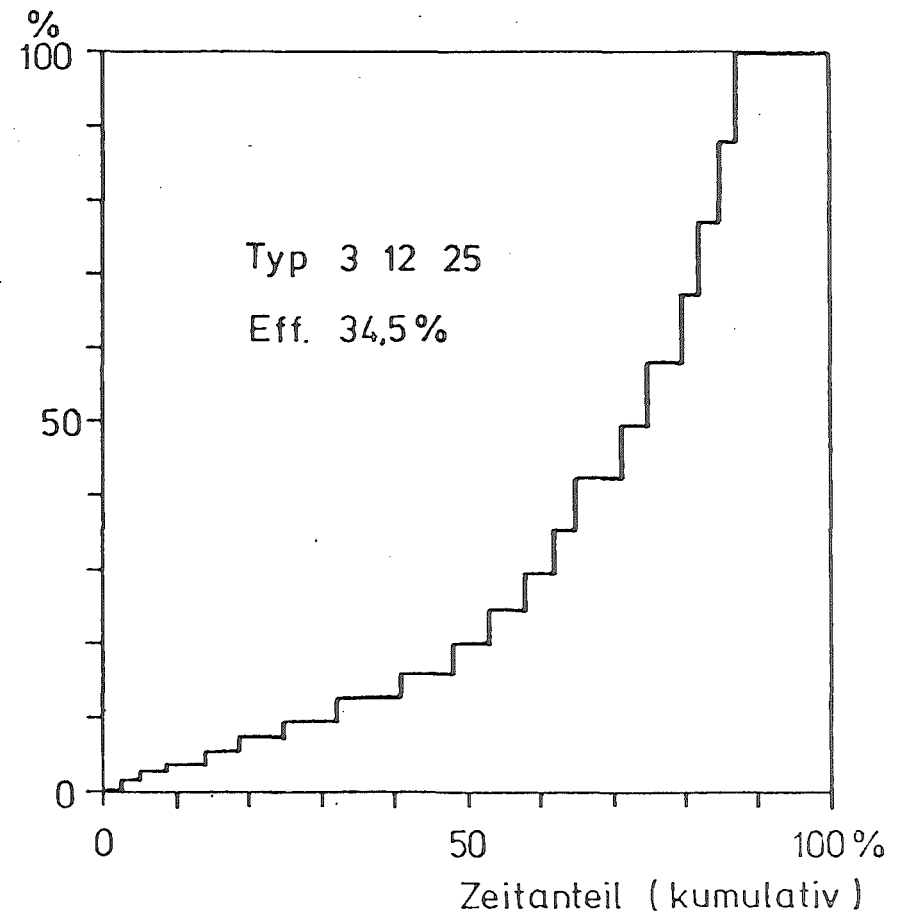
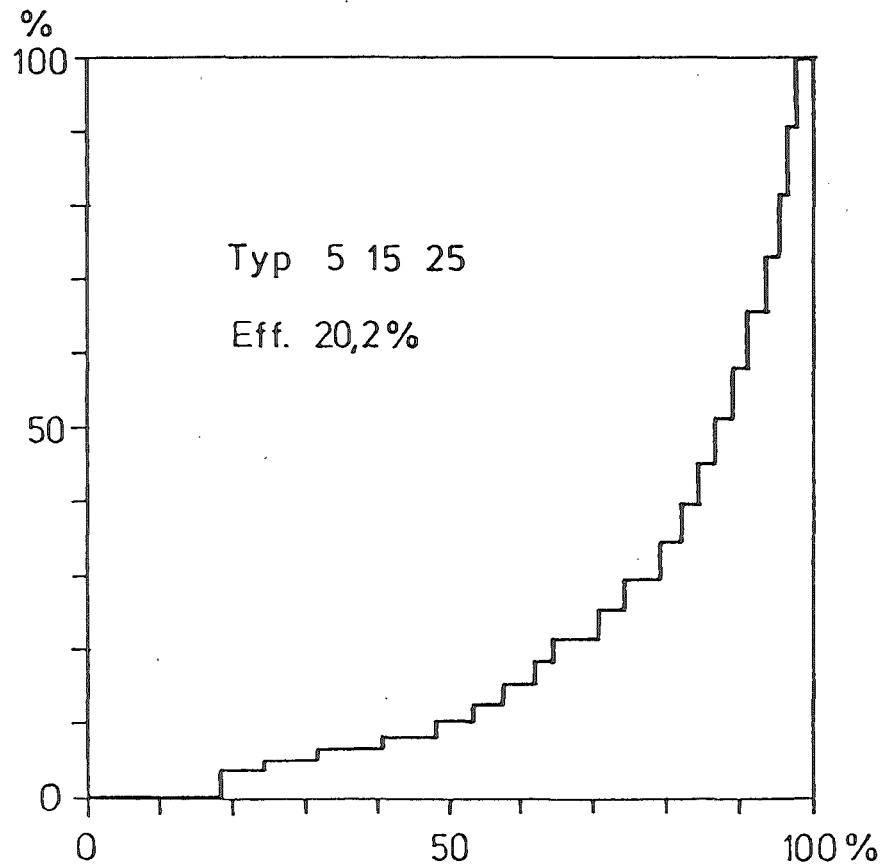
Basisstation (X)
Sonstige (•)

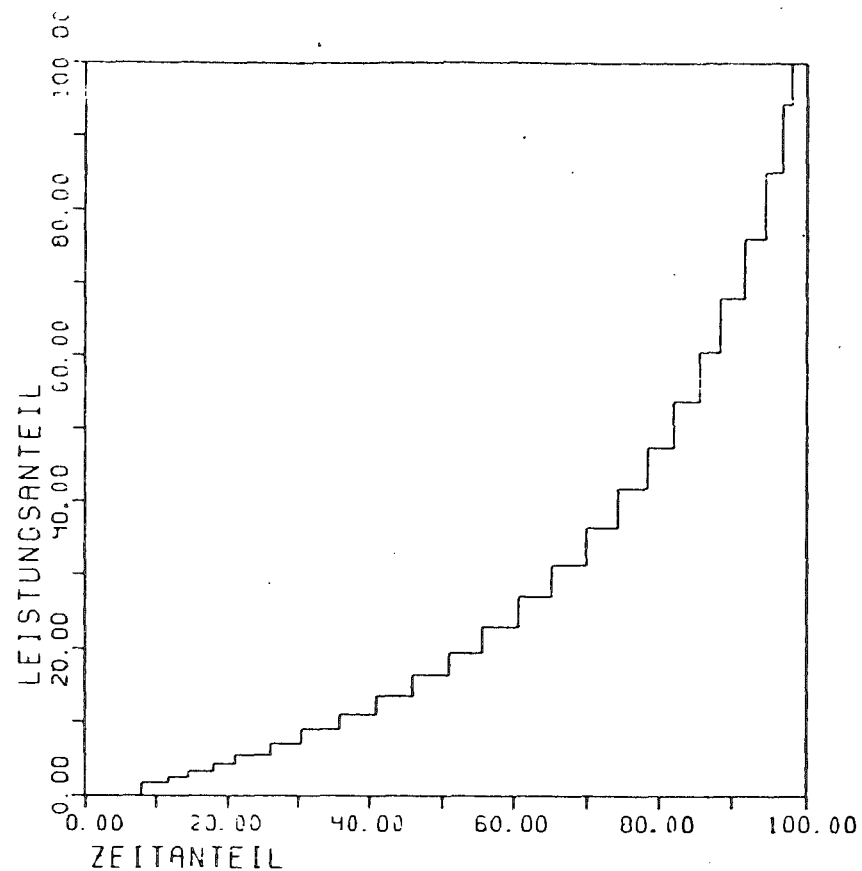
3

Leistungsdiagramme
Einzelbetrieb LIST/ SYLT

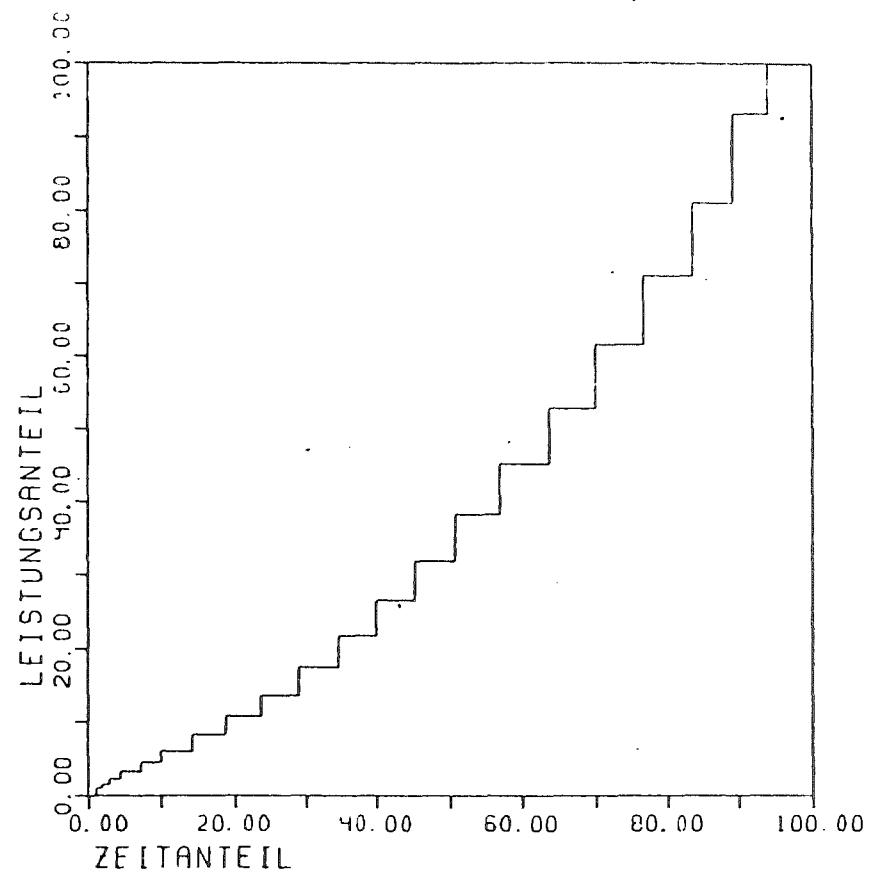
10 m

Leistung





VERBUND WEST-LIST-BRHV EFF 26.4
 ZEIT 1972-1977 JAN-DEZ 0-23 UHR
 TYP 5 15 25 HOEHE 100 METER

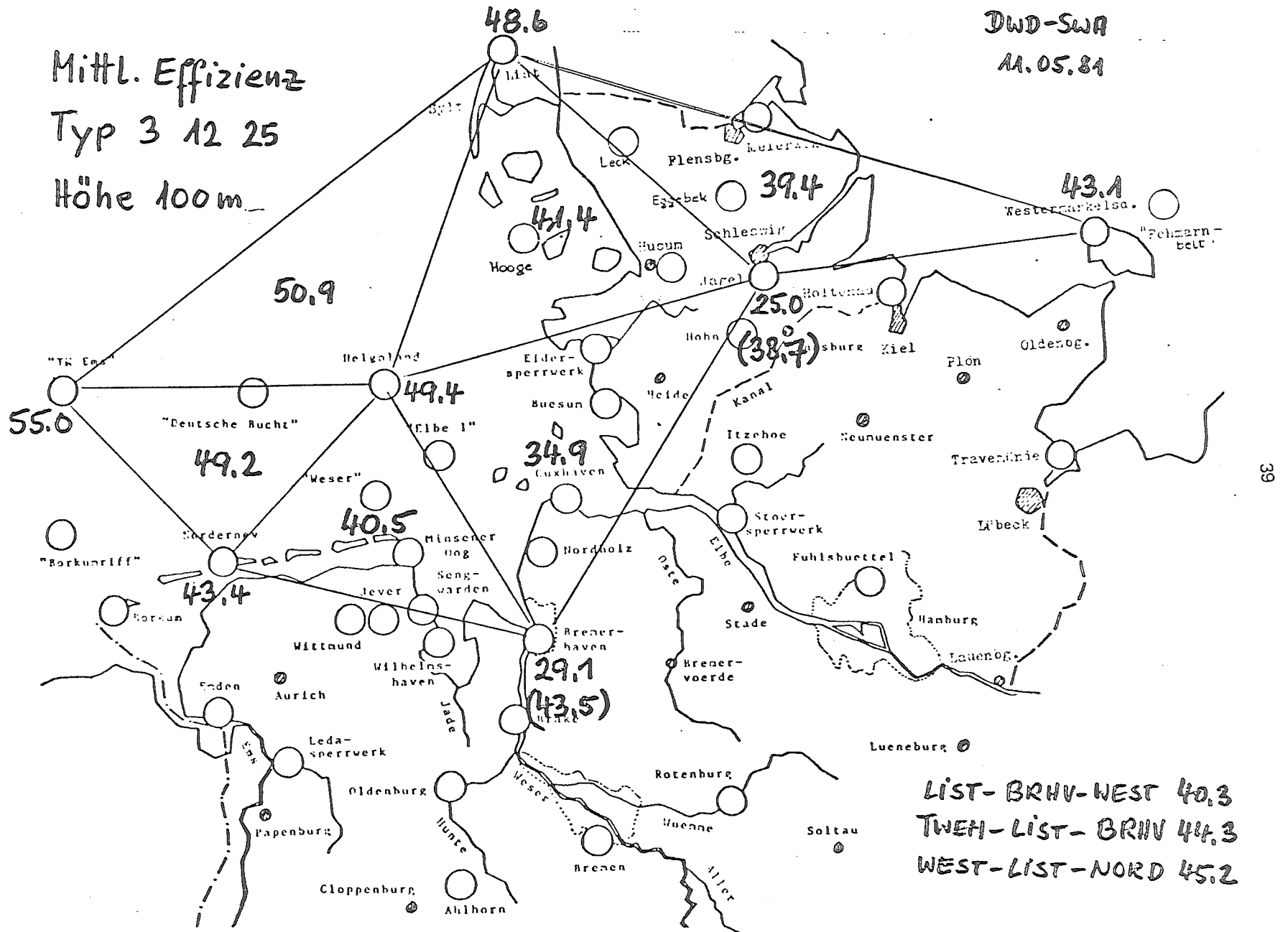


VERBUND WEST-LIST-BRHV EFF 40.3
 ZEIT 1972-1977 JAN-DEZ 0-23 UHR
 TYP 3 12 25 HOEHE 100 METER

766.3

Mittl. Effizienz
Typ 3 12 25
Höhe 100m

DWD-SWA
11.05.81



Mitte. Effizienz [%]

Typ 5 15 25

Höhe 100 m

DWD-SWA
11.05.81

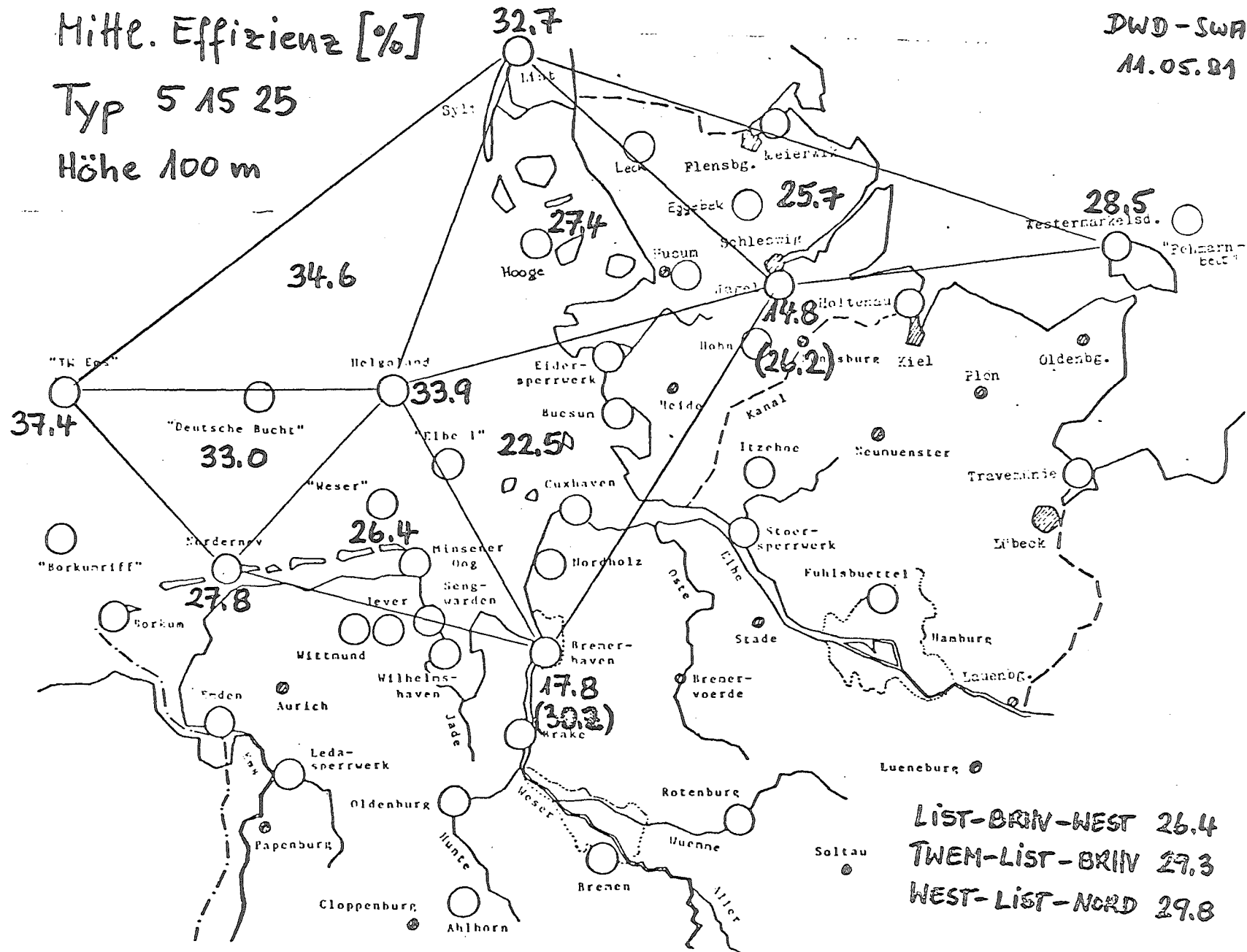


Abb. 5

LIST / SYLT

Höhe [m] über
Talsole

Mittlere Windprofile (60 Minuten)
Potenzprofile eingepaßt

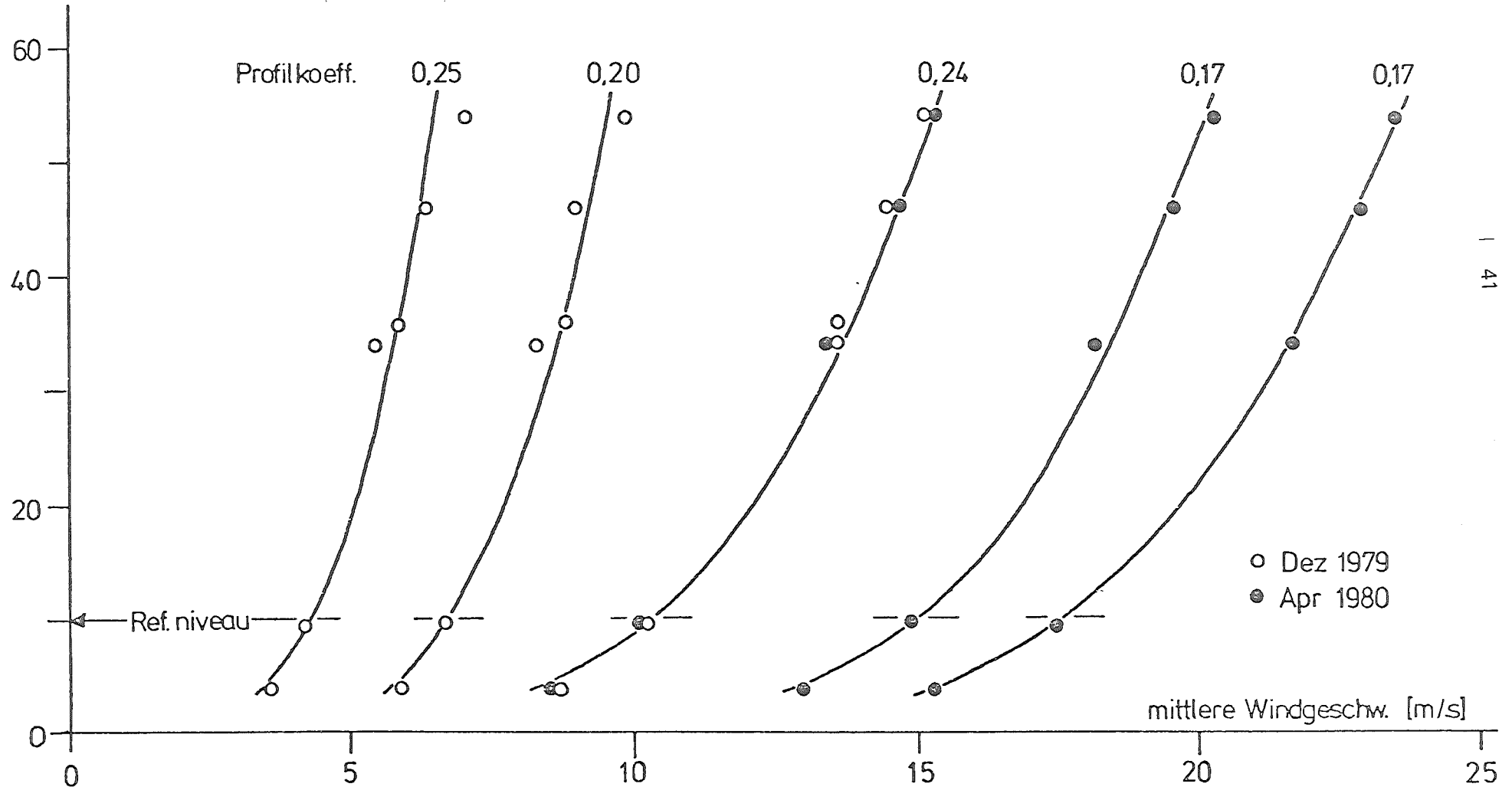


Abb. 6

Die Windverhältnisse in überseeischen Ländern
im Hinblick auf Windkraftnutzung zur Exportförderung
der deutschen Industrie

Georg Duensing, Deutscher Wetterdienst

1. Aufgabenstellung

Die deutsche Industrie steht im Exportgeschäft in sehr harter Konkurrenz zum Ausland. Sie benötigt zur optimalen, preisgünstigsten Auslegung ihrer Projekte und Angebote zuverlässige Klimadaten aus den Exportländern. Der Deutsche Wetterdienst besitzt im Seewetteramt umfangreiches geeignetes Datenmaterial, mit dem die benötigten meteorologischen Unterlagen erarbeitet werden können. Das meteorologische Datenmaterial des Auslandes ist in Quantität und Qualität recht unterschiedlich und bedarf einer gründlichen Prüfung und Aufbereitung, bevor es in geeigneter Form präsentiert werden kann. Durch den Forschungsauftrag des BMFT wurde dieses ermöglicht.

Seit geraumer Zeit wird intensiv an der Entwicklung von Windkraftmaschinen, auch für Entwicklungsländer, gearbeitet. Größere Systeme sind in der Erprobung, kleinere Anlagen werden bereits auf dem Markt angeboten. Die technische Seite dieses Problems wurde übersichtsmäßig in einer vom BMFT geförderten Programmstudie dargestellt.

Aus meteorologischer Sicht wurde von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) 1954 eine Übersicht über die bis dahin verfügbaren Untersuchungen und Winddaten einer Reihe von Ländern herausgegeben unter besonderer Berücksichtigung der ariden und semi-ariden Regionen der Erde. Aus

den für diese Studie in Betracht kommenden Gebieten hatten nur Indien, Pakistan und Ägypten Auswertungen ihrer Winddaten durchgeführt. Aus den anderen befragten Ländern waren nur meist unausgewertete und häufig unveröffentlichte Windwerte unterschiedlicher Qualität vorhanden. Eine neuere Übersicht dieser Art ist bisher nicht bekannt.

Soweit Veröffentlichungen aus Entwicklungsländern überhaupt vorliegen, bestehen sie meist aus Isoventenkarten oder Reihen der Jahres- oder Monatsmittelwerte. Solches Material besitzt nur einen begrenzten Wert, da auf seiner Basis keine Aussagen über die Windvariabilität, d.h. Schwellwertüberschreitungsdauern und Richtungsabhängigkeit gemacht werden können.

Neben der Untersuchung der Windverhältnisse spielen weitere Faktoren eine Rolle: Die von der Luft abgegebene Leistung ist nicht nur der Windgeschwindigkeitsdifferenz vor und hinter dem Rotor proportional, sondern auch der Masse der Luft, d.h. ihrer Dichte. Außerdem befindet sich der Rotor im allgemeinen oberhalb des Niveaus, in dem üblicherweise der Wind gemessen wird. Da die Auflösung etwa vorhandener vertikaler Windsondierungen aus Entwicklungsländern nicht ausreicht, müssen vertikale Geschwindigkeitsprofile aus Modellberechnungen für verschiedene theoretische Ansätze angeboten werden, wobei die Dichteschichtung als Parameter eingeht. Demzufolge ist es erforderlich neben den Windverhältnissen auch die Temperatur- und Feuchteverteilung zu berücksichtigen, die in den in Frage stehenden Klimazonen recht extreme Werte annehmen kann.

Von der zeitlichen Verteilung der Windgeschwindigkeit hängen wesentliche Konstruktionsmerkmale der Windkraftmaschinen ab. Dabei geht es nicht nur um die Wahl der Anlaufgeschwindigkeit für den Rotor und die Festlegung des Arbeitsbereiches, d.h. des Windgeschwindigkeitsbereiches, der am häufigsten angetroffen wird und in dem das Gerät optimal arbeiten soll, sondern auch darum welche installierte Leistung der nach-

geschalteten Arbeitsmaschine wirtschaftlich im Tages- und Jahresverlauf zu vertreten ist. Es muß weiterhin die Häufigkeit auftretender Maximalwindgeschwindigkeiten aber auch die der Flauten bekannt sein, um einerseits die mechanische Belastbarkeit des Systems richtig zu planen, aber auch die Wirtschaftlichkeit der Energieumwandlung zu wahren. Ein Konverter soll bei möglichst geringen Windgeschwindigkeiten noch verwertbare Energie produzieren und aus Sicherheitsgründen erst bei möglichst hohen Windgeschwindigkeiten abgeschaltet werden. Grundsätzlich gilt es zunächst herauszufinden, welche überseeischen Gebiete für den Bau von Windkraftanlagen überhaupt geeignet sind.

Mittlere und kleinere Wirtschaftsunternehmen und Betriebe verfügen nicht über die notwendigen finanziellen Möglichkeiten zur Durchführung der notwendigen meteorologischen Untersuchungen. Daher wird durch die geplante Untersuchung seitens des Deutschen Wetterdienstes eine Informationslücke geschlossen und damit die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Unternehmen gestärkt.

Eine weitere Forderung an Windkraftmaschinen in Entwicklungsländern ist u.a. eine möglichst weitgehende Verschleißfreiheit und Umweltfestigkeit auch bei extremen Umweltbedingungen.

Um hier Hilfen zur optimalen Auslegung solcher Maschinen im Hinblick auf Robustheit und Materialanforderungen zu geben, ist es erforderlich, über Wind, Temperatur und Feuchte hinaus weitere Wetterelemente zu beachten, wie Sand, Staub, Regen, Vereisung, Hagel.

Im einzelnen ergeben sich damit folgende Arbeitsziele:

Erarbeitung von

- 1) Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit
- 2) Schwellwertüberschreitungsdauern der Windgeschwindigkeit
- 3) Windrichtungsverteilungen
- 4) Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit für verschiedene Ansätze

- 5) Häufigkeitsverteilungen und Extremwertstatistiken der relevanten Wetterelemente
- 6) Kurze Klimatologien mit Tages- und Jahresverlauf der Elemente für die untersuchten Gebiete bzw. Stationen

Als untere Grenze des auszuwertenden Zeitraumes werden 5 Jahre angesetzt.

Der Vordere Orient, besonders die arabischen Länder, wurden dabei vorrangig berücksichtigt, da in diesem Raum Möglichkeiten, Investitionsbereitschaft und die Exportchancen der deutschen Industrie relativ groß erscheinen. Die klimatologische Übersicht über den arabischen Raum sowie die Darstellung der Ergebnisse ist nahezu fertiggestellt. Deshalb sollen Ergebnisse aus diesem Raum vorgestellt werden. Es ist geplant, die Ergebnisse einer Station im Anschluß an eine Übersichtsklimatologie des jeweiligen Großraumes als selbständige Einheit anzufügen. Dadurch ist es möglich, die Ergebnisse eines Gebietes jeweils nach Fertigstellung zu veröffentlichen, ohne das Ende des Projektes abwarten zu müssen.

In dem Projekt sollen ca. 50 Stationen in folgenden 5 Regionen untersucht werden:

Südamerika

Sahelzone/Afrika

Nordafrika

Arabien

Fernost

Die Auswahl erfolgte meist unter wirtschaftspolitischen Gesichtspunkten; wobei besonders für Windkraftnutzung interessante aride Gebiete bevorzugt wurden.

2. Datenmaterial

Dem Klimaelement "Wind" wurde in der klassischen Klimatologie weltweit nur eine untergeordnete Rolle zugebilligt. Die Angaben in den Archivunterlagen reichen für Windenergieuntersuchungen nicht immer aus. In diesen Fällen mußten geeignete Daten aus den Ursprungsländern nachgefordert werden. Hier wurden sehr unterschiedliche Erfahrungen gemacht. Teilweise erreichte uns Material, das auf Stundenbeobachtungen basierte, vielfach mußte auf Tagesmittelwerte zurückgegriffen werden, teilweise sind die Länder personell nicht in der Lage, das Material auf einen Mindeststand der Aufbereitung zu bringen (Anemographenschriebe liegen vor, werden aber nicht ausgewertet) oder Antworten blieben ganz aus.

Vielfach ergeben sich auch Zeitverzögerungen durch eine außerordentlich zähe Korrespondenz mit vielen der angeschriebenen Länder, ankunftsverzögerndem Versand per Schiff sowie zeitraubenden Nachforderungen bei lückenhaft übersandtem Material. Bei dem Großteil der Emirate ist die Erlaubnis der Ölgesellschaften notwendig, die in diesen Ländern jahrelang gemessen und die Daten für den Deutschen Wetterdienst noch immer nicht freigegeben haben, obwohl sie selbst an diesem Material nicht arbeiten, an der Auswertung aber interessiert scheinen. Die zusätzliche Datenbeschaffung braucht also längere Zeit als ursprünglich veranschlagt.

Da die einlaufenden Daten außerordentlich unterschiedliche Formate und klimatologische Gesamtinformationen besitzen, sind länderbezogene unterschiedliche Erfassungs-, Prüf- und z.T. auch Verarbeitungsprogramme trotz rationeller Unterprogrammstrukturen erforderlich. Das bringt einen größeren Zeitaufwand für Datenprüfung und Korrektur sowie die Auswertung mit sich als erwartet.

Auf Grund der Struktur des bisher zur Verfügung stehenden Materials ergeben sich zwei Grundprobleme:

1. Das Datenmaterial ist außerordentlich inhomogen bezüglich der Zeit und stammt mit unterschiedlichen Perioden für die einzelnen Länder aus einem Gesamtzeitraum von 1930 - 1979. Da das Klima in diesem Zeitraum bezüglich der Windenergie keinen tiefgreifenden Wandel erlebt haben dürfte, ist die Vergleichbarkeit der Gebiete mit unterschiedlichen Zeitreihen durchaus gegeben.
2. Ein schwierigeres Problem besteht darin, daß die Klasseneinteilung der Windstatistiken oft zu groß gewählt wurde und keine vernünftige Berechnung einer Summenhäufigkeitsverteilung erlaubt. Das ist besonders bei den Ländern der Fall, die uns keine detaillierten Daten liefern konnten. Diese Lücke ist möglicherweise durch synoptische Meldungen zu überwinden. Das sind meteorologische Meldungen, meist von Flugplätzen, die alle 3 Stunden weltweit angestellt und über Fernschreibverbindungen international verbreitet werden. Diese Meldungen gehen beim Deutschen Wetterdienst ein und werden seit 1966 (Nördhemisphäre) und seit 1978 (Südhemisphäre) auf Magnetband gespeichert. Im Rahmen dieses laufenden Projektes ist die Aufgabe jedoch schon wegen des erheblichen Programmieraufwandes und der Datenprüfung nicht zu erledigen.

Vor diesem Hintergrund muß die Güte des Datenmaterials gesehen werden und das Projekt muß einen Kompromiß eingehen zwischen Erreichbarem und Wünschenswertem.

3. Auswertungsergebnisse.

Das Windfeld wird vorrangig bezüglich Richtung und Betrag ausgewertet. Als Beispiel wird Ryiad/Saudi-Arabien vorgestellt, das jedoch exemplarisch für alle weiteren Stationen gelten kann.

Abbildung 1 zeigt die Summenhäufigkeitsfunktion der Windgeschwindigkeit für Riyadh in 10 m Höhe über Grund. In der Ordinate ist die Windgeschwindigkeit ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) aufgetragen, die erreicht oder überschritten wird. Auf der Abszisse ist der prozentuale Anteil abzulesen. Es handelt sich hierbei um das Mittel aus 24 Terminablesungen pro Tag. Im dargestellten Fall wird die Windgeschwindigkeit $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in 27,5 % der Zeit überschritten.

Aus dem Kurvenverlauf können wir schließen, daß das Windangebot in Riyadh nicht reich ist.

Aus dieser Darstellung läßt sich die relative Häufigkeit pro Geschwindigkeitsintervall ableiten. Diese ist im unteren Teil der Abbildung 2 dargestellt. In der Ordinate sind die prozentualen Anteile der in der Abszisse dargestellten Windgeschwindigkeiten ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) ablesbar.

Bei Verwendung der Einheiten des M-K-S-A-Systems (Meter-Kilogramm-Sekunde-Ampère) ergibt sich die Leistung in Watt. Durch Multiplikation mit der Zeitdauer t (z.B. in Stunden), in der der Wind mit der Geschwindigkeit v weht, erhält man die kinetische Energie des Windes in dieser Zeit (z.B. Wh):

$$E = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3 \cdot t \quad \rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad \text{Dichte der Luft}$$

$$A \text{ (m}^2\text{)} \quad \text{Fläche senkrecht zur Luftbewegung}$$

$$v \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \quad \text{Windgeschwindigkeit}$$

$$t \text{ (s)} \quad \text{Zeitintervall}$$

Setzen wir die Fläche mit 1 m^2 und den Wirkungsgrad eines Konverters gleich 1, erhalten wir einen Standardwert, den wir "Bruttoenergie" bezeichnen. Wird der Zeitraum auf ein Jahr bezogen, wählen wir den Ausdruck "Bruttojahresenergie".

Aus den relativen Häufigkeiten pro Geschwindigkeitsintervall läßt sich die Bruttojahresenergie pro Geschwindigkeitsintervall und die Gesamtsumme berechnen. Sie ist im oberen Teil der Abbildung 2 dargestellt. Den höchsten Anteil zur Gesamtenergie liefern für Riyadh die Winde um $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

In dieser Weise liegen bisher ausgewertet vor:

Saudi-Arabien:	13 Stationen
Irak	: 3 Stationen
Sahel	: 11 Stationen
Venezuela	: 3 Stationen
Libyen	: 3 Stationen

4. Einfluß der Verwendung verschiedener Mittelwerte auf das errechnete Energieangebot.

Für Saudi-Arabien lagen über 60 Jahre nur die Tagesmittel vor (1971-1976). Für einen 2-Jahresabschnitt (1977/1978) stand parallel ein zweites Datenkollektiv zur Verfügung auf der Basis stündlicher Beobachtungen.

Der Vergleich der Summenhäufigkeit (Abbildung 3) zeigt den "Glättungseffekt" des Tagesmittels. Calmen und hohe Geschwindigkeiten werden nivelliert. Die Gesamtenergie wird aus den Terminwerten höher berechnet als bei Benutzung von Tagesmittelwerten. Dieser Zuwachs (wegen $E \sim V^3$) wird vor allem aus den höheren Geschwindigkeitsbereichen gespeist, und zwar aus 5-7 % des Kollektivs, wie Abb. 3 im oberen Verlauf der Kurven A und B und auch Abb. 4 zeigen.

Die Abb. 4 zeigt in der Ordinate die aus dem Wind erzielbare Energie pro Jahr und Quadratmeter. Auf der Abszisse sind die Geschwindigkeitsintervalle abgetragen. Die dünnausgezogene Treppenkurve stellt den sich aus den Tagesmittelwerten ergebenden Energiezuwachs pro Geschwindigkeitsintervall dar. An der fettausgezogenen Treppenkurve sehen wir, daß der höhere Wert der verfügbaren Energie hauptsächlich aus Windgeschwindigkeiten oberhalb $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ errechnet wird.

Zu erwarten ist dieses Phänomen bereits aus dem deutlich ausgeprägten Tagesgang (Abb. 5), wonach das Maximum gegen 15.00 Uhr Ortszeit auftritt. Somit ist in den Tagesstunden im Mittel auch die höchste Energieausbeute zu erwarten. Die Verwendung von Tagesmittelwerten gibt also eine untere Grenze der verfügbaren Windenergie an.

Eine weitere Abschätzung zeigte, daß das Ergebnis aus den 24 Stundenwerten auch durch die Verwendung von nur 4 (günstig gelegenen) Terminwerten verifiziert werden konnte. Das ist ein Indiz dafür, daß wenige Terminwerte pro Tag u.U. ein realistischeres Gesamtergebnis erzielen als Tagesmittelwerte.

Den Medianwert sollte man in diesen Klimagebieten nicht dem arithmetischen Mittelwert vorziehen. Beispielsweise mögen von 100 Beobachtungswerten 51 Calmen und 49 Fälle mit 20 m s^{-1} auftreten. Dann beträgt der Medianwert $W = 0 \text{ m s}^{-1}$, der arithmetische Mittelwert $\bar{m} = 9,8 \text{ m s}^{-1}$. Die Verteilung der Windgeschwindigkeiten sind in vielen Klimaten sehr schief. Deshalb haben dort Mittelwerte geringe Aussagekraft gegenüber Interpretationen von Häufigkeitsverteilungen.

Die Energieabschätzung ist von einigen Autoren aus dem Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit erfolgt. Sie reicht nicht für die erste Näherung einer Schätzung der Energieausbeute aus dem Jahresmittelwind aus. Ein solches Verfahren unterschätzt das Energiepotential systematisch. Die Darstellung (Abb. 6) zeigt, in welchen Maße das für die von uns untersuchten Regionen der Fall wäre:

Vielfach - je nach den örtlichen Verhältnissen - beträgt das "wahre" Windangebot mehr als 100 % des aus dem Jahresmittelwind berechnete, in einem Fall sogar 390 %.

Die durchgezogene Kurve gibt diejenige Bruttojahresenergie an, die man erhält, wenn der Wind das gesamte Jahr über mit der Geschwindigkeit des Jahresmittels weht.

Die verschiedenen Symbole geben diejenige Bruttojahresenergie an, die man aus den von den Stationen vorliegen-

den Verteilungen erhält. Würde sich die Bruttojahresenergie aus dem jeweiligen Medianwert eines Kollektivs berechnen lassen, würden die Bruttojahresenergiwerte einer Station auf der durchgezogenen Kurve liegen. Sie liegen alle darüber, weil die Verteilungen des Windes schief sind. In einem bisher gefundenen Fall ist der Medianwert 0, die Bruttojahresenergie 170 KWh pro Jahr und m^2 :

Es lohnt sich also gerade für windschwache Regionen das Gesamtkollektiv zu untersuchen.

5. Regionale Übersicht über die Jahresbruttoenergien

Für die bisher fertiggestellten Gebiete Nordafrika, Sahel und Arabien ergibt sich die in Abb. 7 wiedergegebene regionale Verteilung der Bruttojahresenergie in KWh pro Jahr und m^2 . Verglichen mit den Verhältnissen etwa des norddeutschen Küstenfeldes beträgt die Energieausbeute aus dem Windfeld nur zwischen 3,5 und 85,0 % der hiesigen Verhältnisse (deutsche Küste ca. 4000 KWh pro Jahr und m^2).

Lohnt es sich unter diesen Umständen, Windenergie dort überhaupt zu nutzen? Nach bisher vorliegenden Überlegungen läßt sich diese Frage bejahen, aber wir können die mitteleuropäischen technischen Dimensionen nicht einfach nach Übersee übertragen. Es muß umgedacht werden!

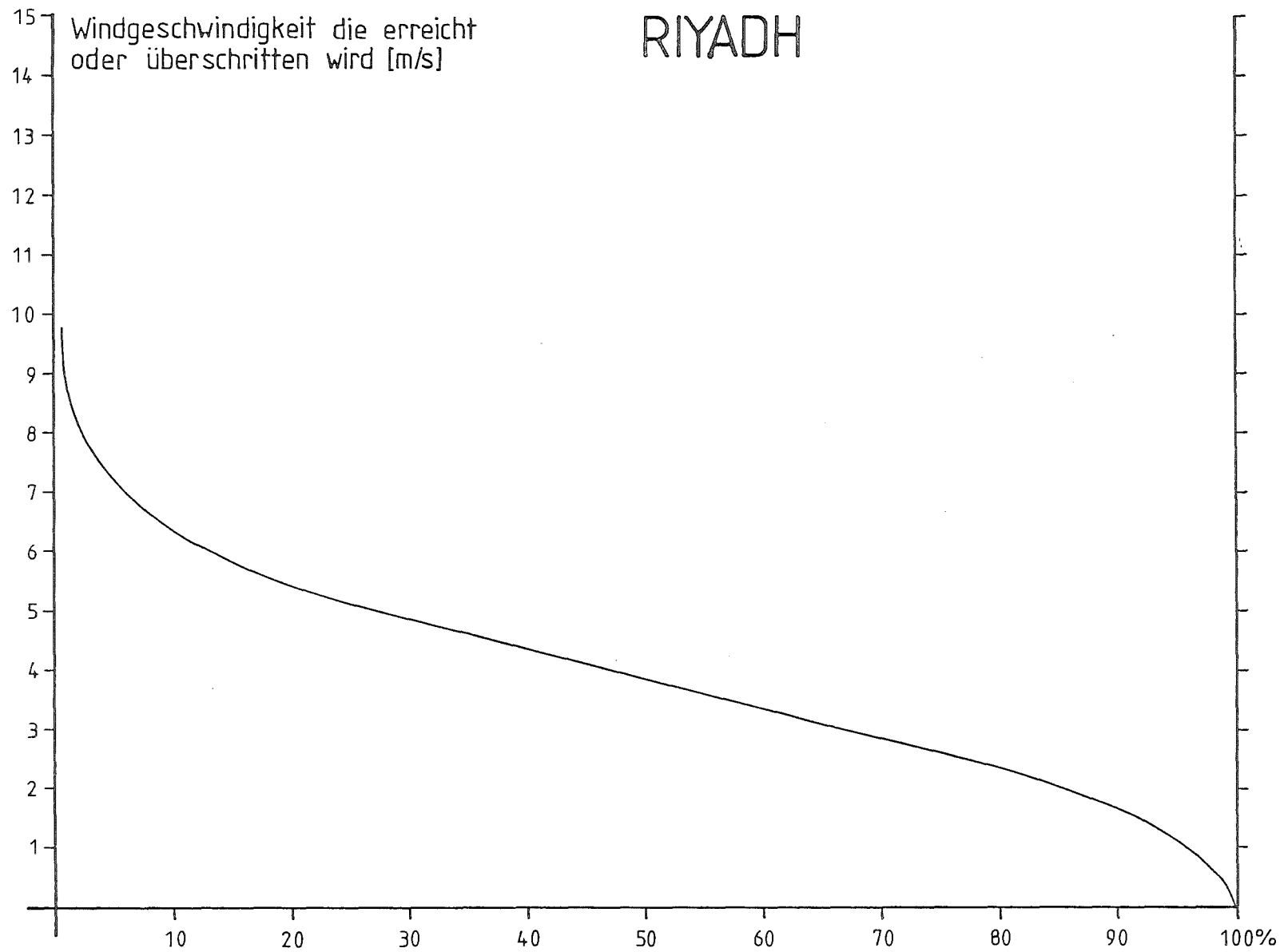
Für die Gewinnung elektrischer Energie im großen Stil, etwa Einspeisung in Verbundnetze dürften nur wenige Standorte geeignet sein. Statt dessen ist das Gewicht auf örtlichen Gewinn/Verbrauch, bei bester technologischer Ausnutzung geringer Windgeschwindigkeiten zu legen. Dieser Weg wurde bereits in einer Studie der Firma Dornier über die Einsatzmöglichkeiten von Windkraftanlagen in Entwicklungsländern skizziert.

Nachteilig wirkt, daß - wie z.B. in Indien - die Zeit größten Energiebedarfs, d.h. Wasserbedarfs, nicht immer mit dem größten Windenergieangebot zusammenfällt. Aber Tewari (1978)

zeigte, daß bereits Windgeschwindigkeiten von 10 km h^{-1} (ca. 3 m s^{-1}) ausreichen, um mit Windkraft aus flachen Brunnen Wasser zu pumpen. In diesem Rahmen können Windmühlen kostenmäßig in Anschaffung, Abschreibung, Wartung und Reparatur mit Dieselpumpen und auch Ochsen konkurrieren. In einem Experiment in Indien erreichte man durch geeignete Fruchtfolge bei ausreichender Wässerung 4 Ernten pro Jahr. Windmühlen in Entwicklungsländern müssen einfach zu warten und sehr robust gegenüber Witterungseinflüssen sein. Daher werden im vorliegenden Projekt auch die übrigen Klimaelemente, wie Temperatur, relative Feuchte und Niederschlag als korrosionsfördernde Elemente sowie das Auftreten besonderer Wetterphänomene wie Sand-, Staubstürme, Hagel, Gewitter etc. untersucht.

6. Ausblick

Neben der textlichen Fassung der Ergebnisse stehen die Berechnungen der Windenergie aus 6 Ländern noch aus. Diese sind in Arbeit. Für eine Reihe von weiteren Ländern liegt im Seewetteramt Datenmaterial vor, z.T. in Form von bis zu 3 Terminwerte pro Tag. (Klimatermine) Gemessen an den Erfahrungen mit Saudi-Arabien ist dieses Material sehr brauchbar. In diesen Fällen wäre es allerdings empfehlenswert, mehr als 5 Jahre auszuwerten.



RIYADH

Bruttojahresenergie

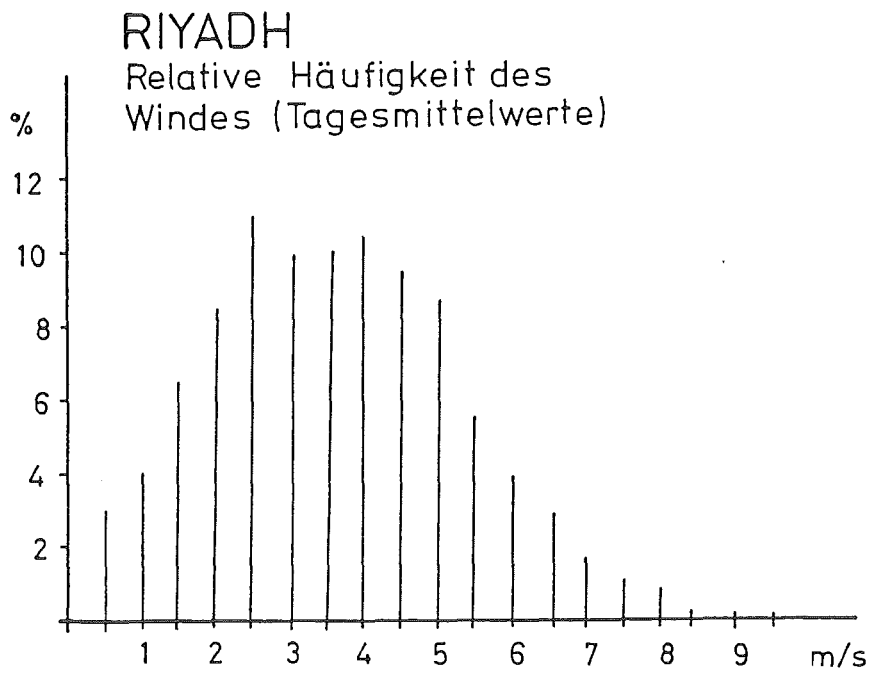
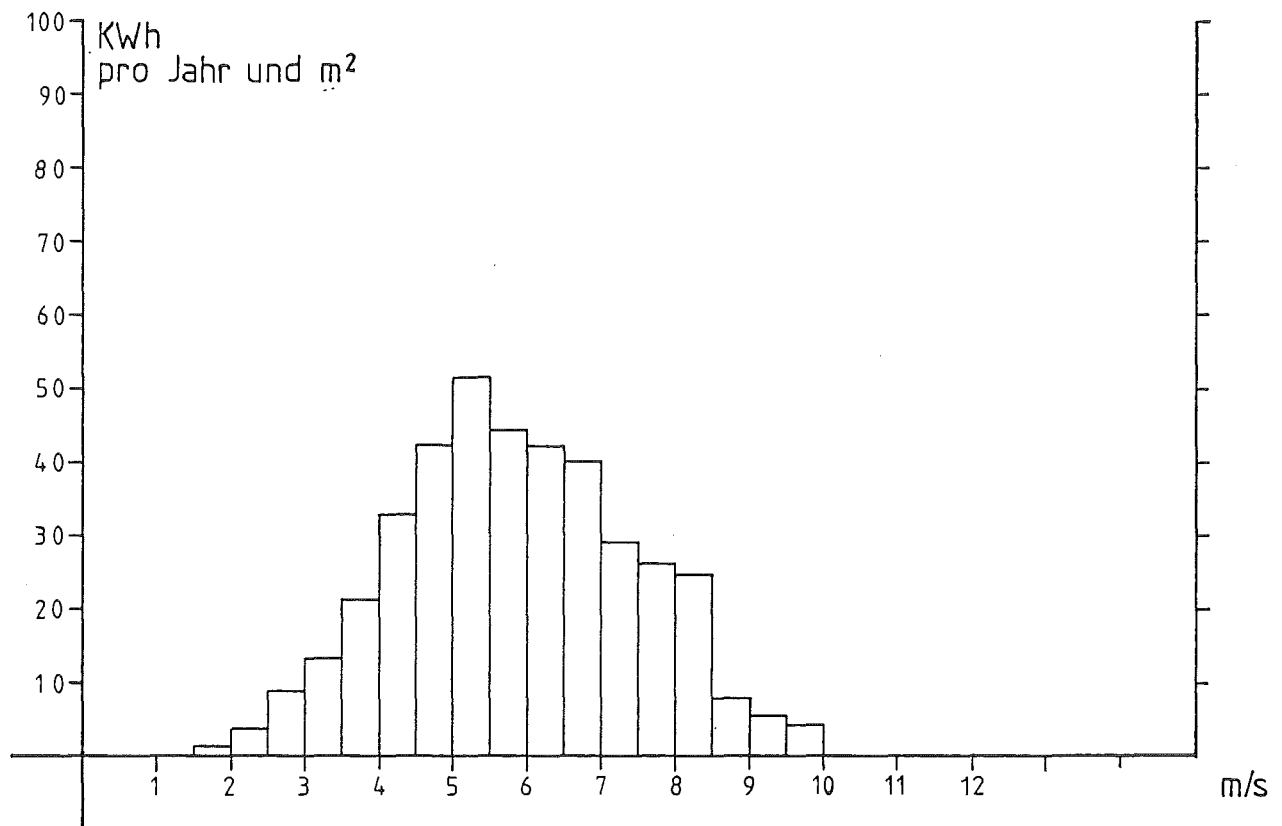


Abbildung 2

Summenhäufigkeitsfunktion Wind

A stündliche Ablesungen (24 pro Tag)

B Tagesmittelwerte

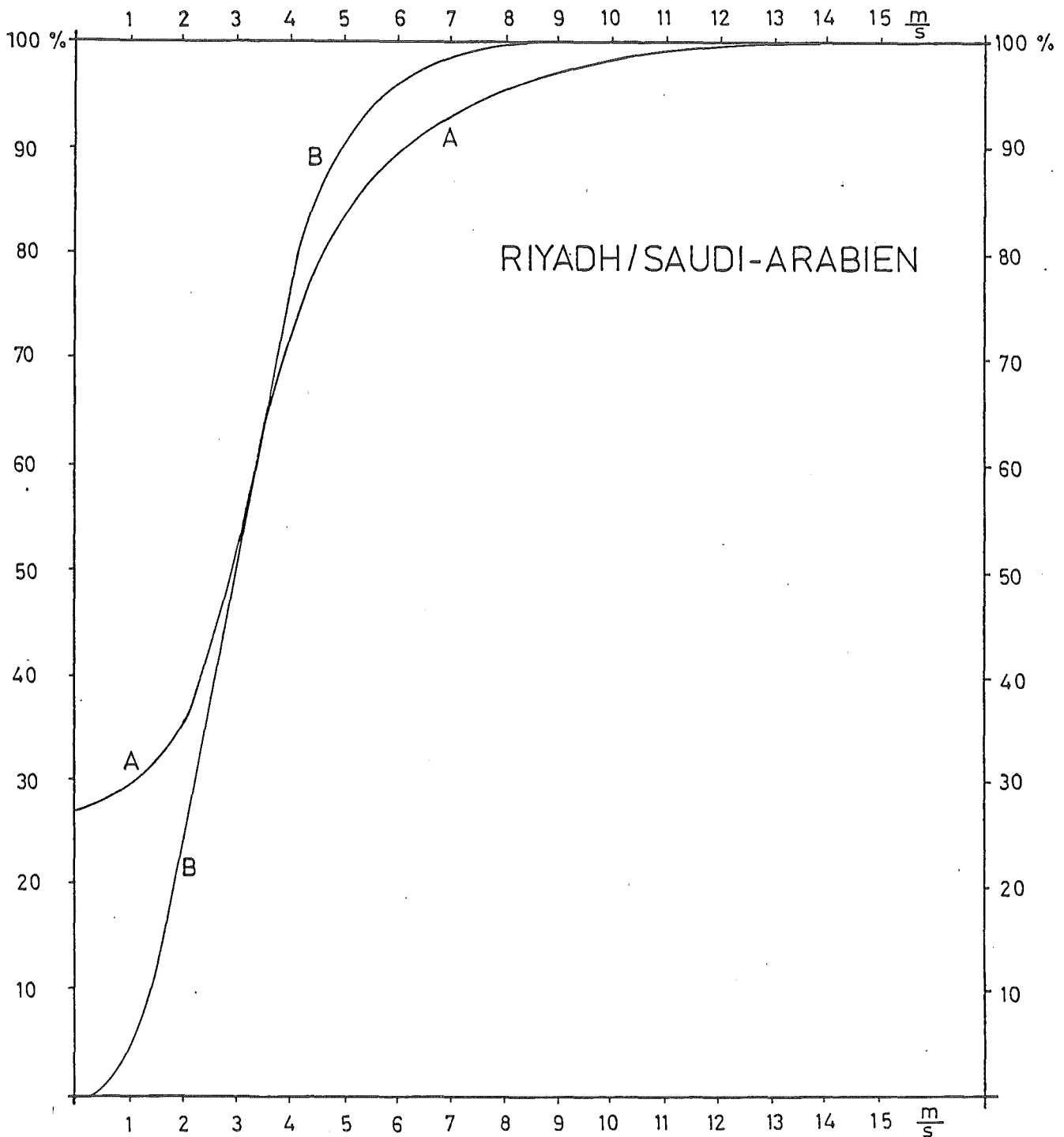


Abbildung 3

Riyadh (1977/78)

Energiezuwachs pro Geschwindigkeitsintervall

kWh
pro Jahr
und m²

— stündliche Ablesungen

— Tagesmittelwerte

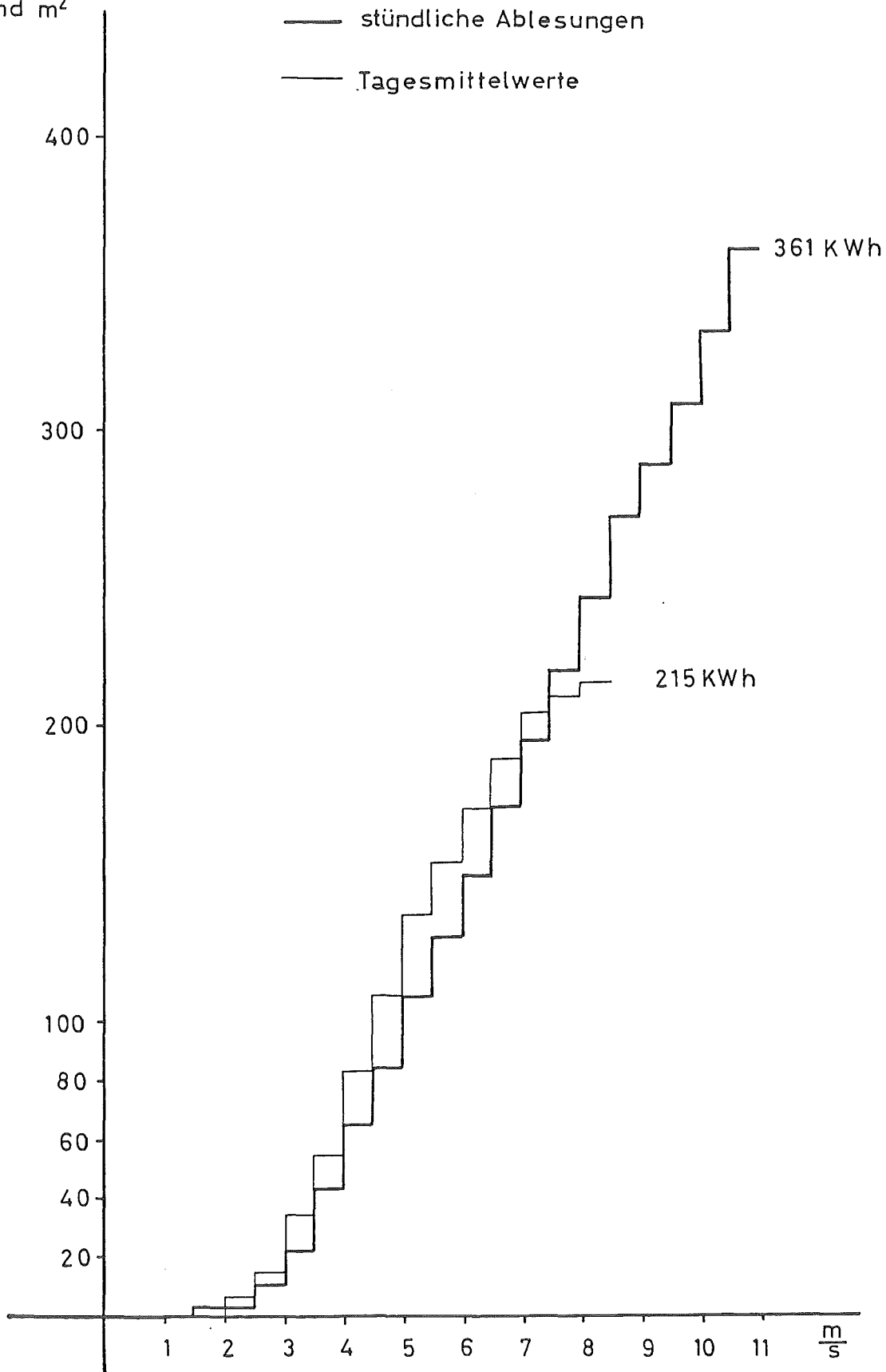


Abbildung 4

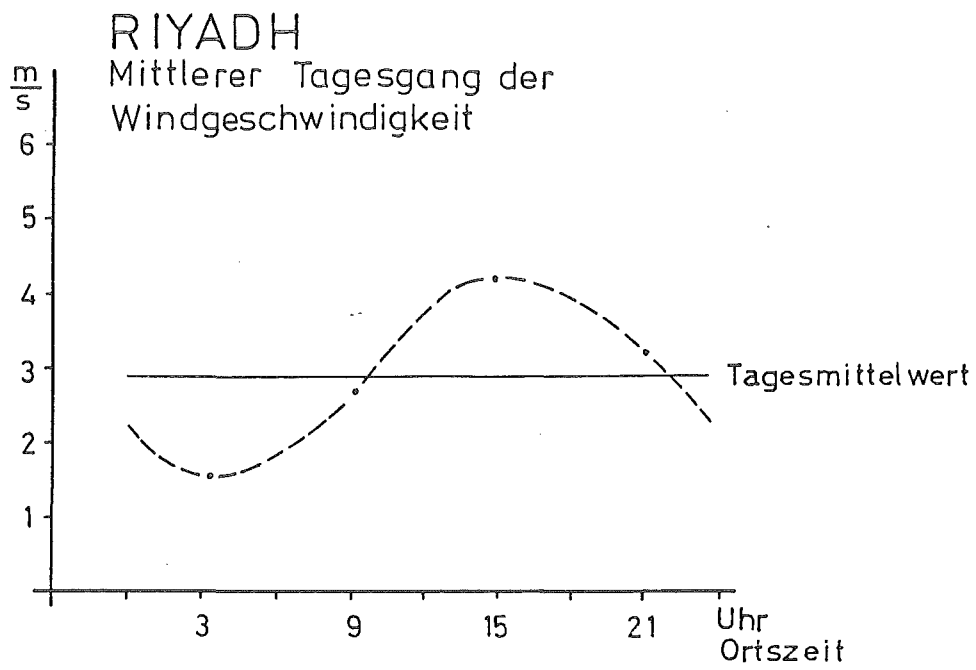
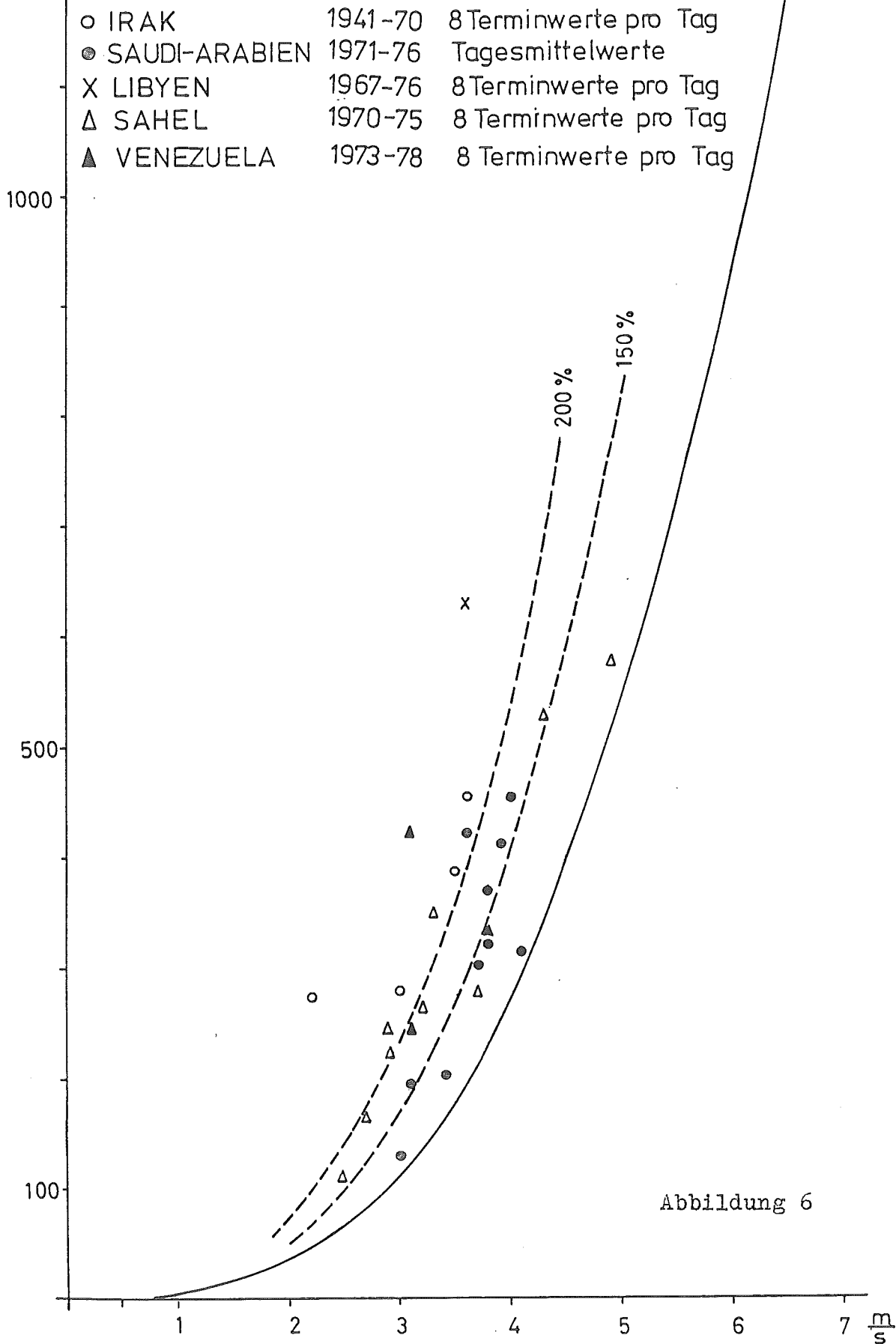


Abbildung 5

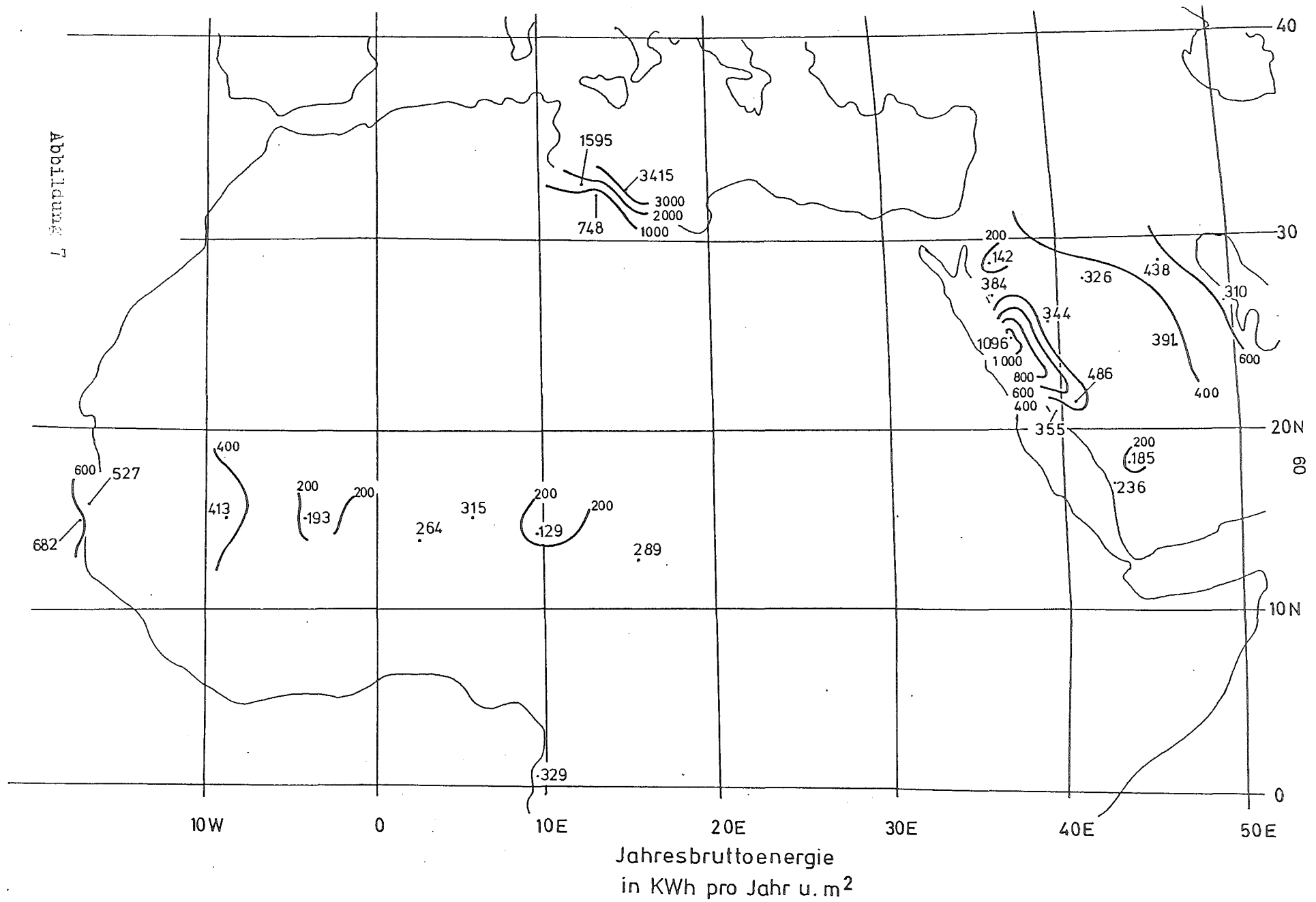
KWh
pro Jahr u. m²

X 59



△ △ X ● ○ Jahresbruttoenergie aus dem Windfeld
— Jahresbruttoenergie aus dem Jahresmittelwert
--- 150% und 200% der aus Jahresmittelwert berechneter Energie

Abbildung 7



Entwicklung eines einfachen Windmeßgerätes
für Entwicklungsländer

W. Hallmann, R. Grundmann, H. Schäfer
Fachhochschule Aachen

Bei der Planung von Windkraftanlagen stellt sich oft die Frage, ob an dem vorgesehenen Aufstellungsort ein ausreichendes Windaufkommen zu erwarten ist. Besonders für Entwicklungsländer mit örtlich noch nicht vermessenen Gebieten wäre eine Entscheidungshilfe für die Wahl des Einsatzortes von Windkraftanlagen, z. B. zur Wasserförderung oder -aufbereitung, vorteilhaft. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens vom Bundesminister für Forschung und Technologie, ET 4373 A, ein einfaches Windmeßgerät, im weiteren WMG genannt, entwickelt. Das Gerät soll in der Lage sein, ohne Fremdenergie über einen bestimmten Zeitraum (ca. 6 - 8 Monate) eine Aussage über die mittlere Windgeschwindigkeit, über die Windleistung und damit über die gerätebezogene Windarbeit am Aufstellungsort in der Aufstellungshöhe zu machen. Bei der Auslegung des WMG's ergaben sich mehrere Randbedingungen, die berücksichtigt werden mußten.

- Das WMG soll handlich sein
 - . in den Abmessungen,
 - . bei der Montage,
 - . bei der Bedienung auch für ungeschultes Personal in den Entwicklungsländern.
- Das WMG soll während der Meßdauer auch bei extremen Umgebungsbedingungen, wie
 - . hohe Temperatur,
 - . hohe Luftfeuchte,
 - . Sandstürme
 funktionsfähig bleiben.
- Das WMG muß zu einem niedrigen Preis herzustellen sein. Die Kostenvorstellung lag bei ca. DM 1.400,--, wobei die Kosten stark abhängig von der Stückzahl sind.

Üblicherweise sind bei der Auslegung von Windradprojekten der Aufstellungsort, die Nabenhöhe des Rotors und die statistisch häufigste Windgeschwindigkeit an dieser Stelle bekannt. Damit sind die Eingangsvoraussetzungen für eine Flügeloptimierung gegeben.

Da nun bei dem zu entwickelnden WMG ein zeitlich unbekanntes Windfeld an jedem potentiellen Aufstellungsort hinsichtlich der mittleren Windgeschwindigkeit in einem Zeitraum und damit der Windarbeit an diesem Ort untersucht werden soll, ist eine Optimierung der Rotorflügel nicht

möglich. Aus diesem Grunde ist es auch gleichgültig, welches Rotorantriebssystem gewählt wird. Entscheidend ist, daß das WMG mit einem konstanten, drehzahlunabhängigen Belastungsmoment beaufschlagt wird, sowie die Eichung im Windkanal.

Das Meßprinzip des WMG ist einfach. Es beruht auf dem Zusammenhang

$$z = \int_0^{\Delta t} n(t) dt$$

zwischen der Anzahl der Rotorumdrehungen z und der Drehzahl n im Meßintervall Δt . Die Umkehrung dieser Beziehung findet ihre Anwendung beim WMG.

Während eines bestimmten Meßintervalls Δt wird die Anzahl der vom Rotor gemachten Umdrehungen z durch einen Zähler registriert.

Die Anzahl der Umdrehungen dividiert durch den Ablesezeitraum ergibt eine mittlere Drehzahl \bar{n} des WMG's:

$$\bar{n} = \frac{z}{\Delta t}$$

Zwei Kriterien liefert diese mittlere Drehzahl \bar{n} :

- 1) Über die Geräte-Windkanal-Eichkurve (Abb. 1) kann damit auf die "mittlere Windgeschwindigkeit" \bar{v} während des betrachteten Meßintervalls am Aufstellungsort in Nabenhöhe geschlossen werden.
- 2) Das Produkt aus der "mittleren Drehzahl" \bar{n} und dem vorhandenen konstanten Belastungsmoment M_d läßt einen Schluß auf die Windradleistung, allerdings gerätebezogen, zu. In Verbindung mit dem Leistungsbeiwert c_p aus der Eichkurve nach Abb. 1 ist auch eine Aussage über die "mittlere Windleistung" am Aufstellungsort möglich.

Bei der Übertragung auf Großanlagen müssen die Kennfelder miteinander verglichen werden.

Der Aufbau der WMG ist so gestaltet, daß die meisten Bauteile aus der laufenden Serienfertigung der Zulieferer stammen und keine Sonderanfertigung sind.

Als Antrieb stehen zur Zeit zwei Versionen bereit:

- 1) ein 6-blättriges Axialrad mit 0,5 m Rotordurchmesser,
- 2) ein 3-blättriger Propeller mit 0,5 m Rotordurchmesser.

Beide Versionen wurden im Windkanal untersucht und geeicht. Unabhängig von den beiden Rotorarten stellten sich mit den entsprechenden Eichkurven dieselben Ergebnisse ein.

Ein Gehäuse aus Leichtmetallguß, ursprünglich von einer Windrad-Wasserpumpe, nimmt die Antriebswelle samt Lagerung auf und dient zur Befestigung der übrigen Bauteile.

Das Kernstück der Entwicklung ist die dauermagnetische Hysteresebremse. Sie gibt berührungslos das drehzahlunabhängige konstante Belastungsmoment M_d vor. Außerdem bewirkt die Magnetbremse, daß das Meßgerät erst ab einer bestimmten Auslegungsgeschwindigkeit, hier 3 m/s, mit der Registrierung beginnt. Durch Verändern des Luftspaltes zwischen Magnet und Hysteresescheibe läßt sich das Belastungsmoment einstellen. Die Registrierung und Anzeige der Rotorumdrehungen erfolgt durch einen Umdrehungszähler, dessen Anzeigeekapazität durch ein vorgeschaltetes Getriebe wesentlich erhöht werden kann. Eine Verkleidung schützt Zähler, Getriebe und Bremse und verbessert die Aerodynamik des Gerätes.

Abb. 2 zeigt die WMG-Version mit Axialradantrieb und zu Anschauungszwecken abgenommener Verkleidung.

Abb. 3 zeigt die WMG-Version mit Propellerantrieb und mehrstufiger Magnetbremse. Die geplante Aufstellungshöhe ist 3 m, 6 m oder 9 m, wobei der Mast durch Seile abgespannt wird und zum Ablesen des Zählerstandes umgelegt wird.

Zu jedem WMG gehört eine Eichung. Sie wird im Windkanal durchgeführt und hat die Aufgabe, die Magnetbremse auf das Auslegungsbremsmoment einzustellen und die Eichkurven zu ermitteln. Diese Eichkurven sind in Abb. 1 sowohl für die Axialradversion als auch für die Propellerversion dargestellt. Es handelt sich dabei einmal um die Abhängigkeit der Drehzahl n von der Anströmgeschwindigkeit v , zum anderen um den Leistungsbeiwert c_p in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit v . Der Parameter dieser Kurven ist jeweils das erforderliche Belastungsmoment M_d .

Zur Auswertung der Messung sind die Eichkurven und der Zählerstand des WMG's erforderlich. Zuerst wird die "mittlere Drehzahl" \bar{n} bestimmt.

$$\bar{n} = i \cdot \frac{z_2 - z_1}{t}$$

mit \bar{n} = mittlere Drehzahl in min^{-1}
 i = Übersetzungsverhältnis des Getriebes
 z_1 = Zählerstand zu Beginn der Messung
 z_2 = Zählerstand am Ende der Messung
 t = Meßdauer in min.

Aus der Eichkurve wird dann mit der "mittleren Drehzahl" \bar{n} die "mittlere Windgeschwindigkeit" \bar{v} ermittelt. Da auch das Belastungsmoment bekannt ist, läßt sich aus der Eichkurve $c_p = f(v)$ nach der Beziehung

$$\bar{P}_{\text{WIND}} = \frac{M_d \cdot \pi \cdot \bar{n}}{c_p \cdot 30}$$

auch die "mittlere Windleistung" im betrachteten Meßintervall berechnen.

Neben der rein mechanischen Version des WMG wurde auch eine elektrische Variante untersucht. Hierbei ersetzte ein Fahrraddynamo die Hysteresebremse der mechanischen Ausführung, ein Amperequadratstunden-Zähler den mechanischen Zähler. Der Vorteil dieser Variante liegt darin, daß man den Zähler vom Erdboden aus ablesen kann, ohne den Mast umzulegen.

Theoretische und experimentelle Versuche wurden durchgeführt, um die Möglichkeit zu erhalten, einzelne Geschwindigkeitsbereiche einzeln zu erfassen. Auch hierbei sollten dauermagnetische Hysteresebremsen das Belastungsmoment liefern. Es stellte sich jedoch heraus, daß eine solche Konstruktion die Forderung nach einem preiswerten WMG nicht erfüllen konnte.

Abb. 4 zeigt noch einmal in komprimierter Form die Thematik des WMG.

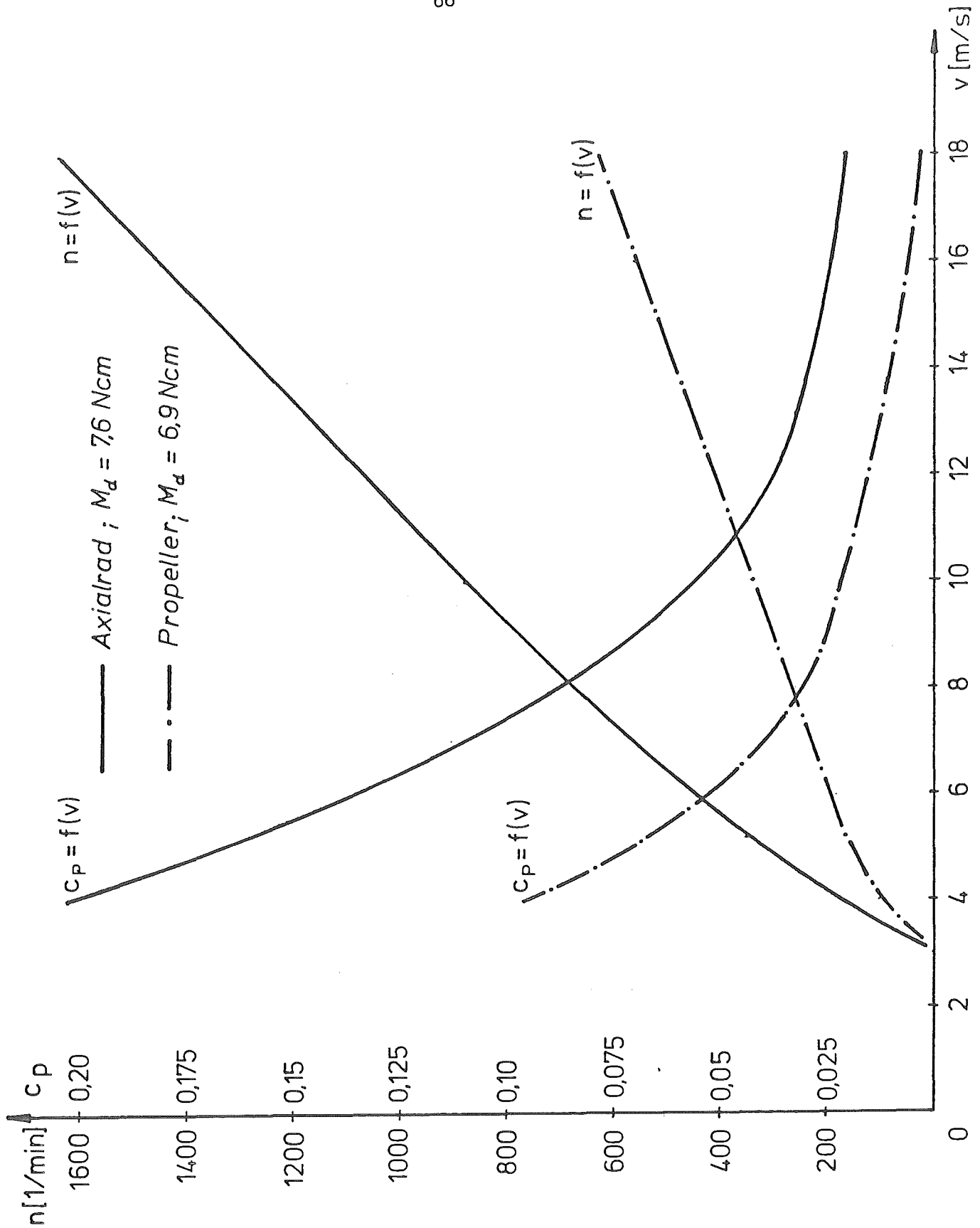


Abb. 1: Eichkurven für die WMG Version mit Propeller- und Axialradantrieb

Getriebe

Zähler

Magnetbremse

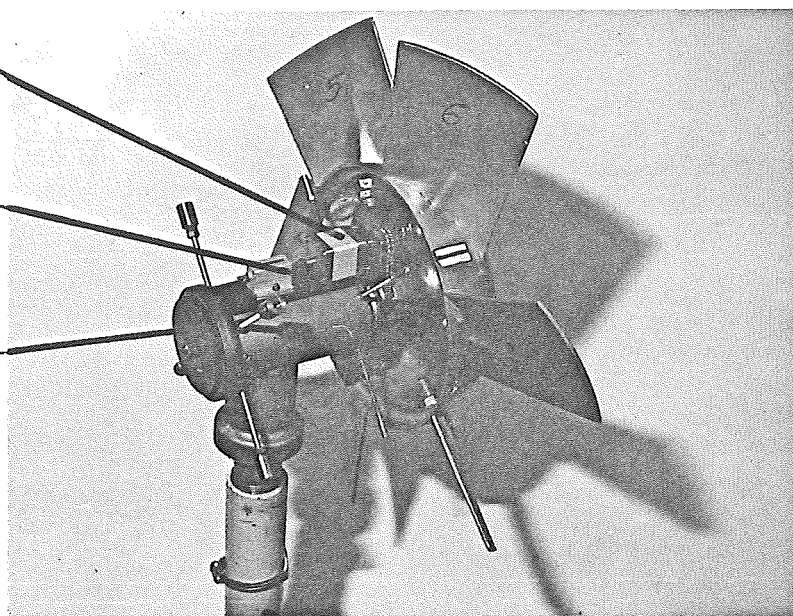


Abb. 2: WMG Version mit Axialradantrieb
(ohne Verkleidung)



Abb. 3: WMG Version mit Propellerantrieb

Zielsetzung:

Entscheidungshilfe für die Wahl des Einsatzortes von Windkraftanlagen, z.B. zur Wasserförderung oder -aufbereitung.

Einsatzgebiete:

örtlich noch nicht windvermessene Gebiete, vorwiegend in Entwicklungsländern.

Einsatzdauer:

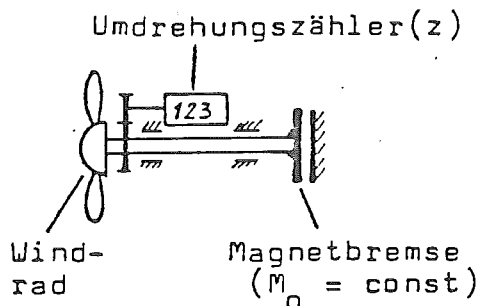
ca. 6 bis 8 Monate.

Anforderungen an das Windmeßgerät:

- einfache, mechanische Ausführung,
- preiswert,
- einfache Handhabung und Registrierung,
- keine Fremdenergie außer Windenergie zum Betrieb erforderlich.

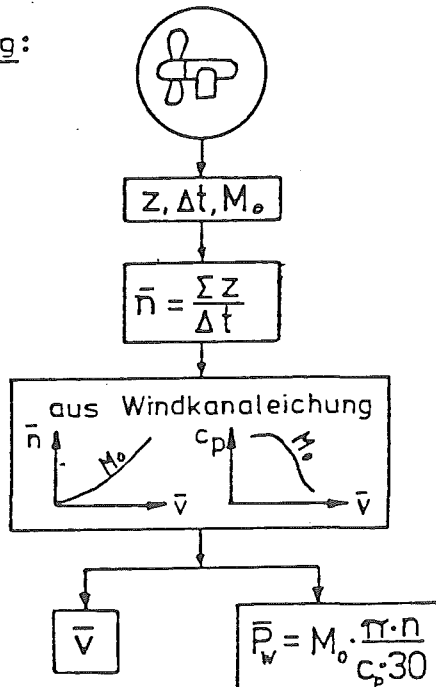
Aufbau des Windmeßgerätes:

Meßprinzip



$$W_{1-2} = \int_1^2 M_o d\varphi = M_o \int_1^2 d\varphi = M_o (\varphi_2 - \varphi_1) \\ = M_o \Delta\varphi = M_o \cdot 2\pi z$$

W_{1-2} = gerätebezogene Windarbeit im Meßintervall,
 M_o = const. Bremsmoment (Last)
 z = Zahl der Umdrehungen

Auswertung:

\bar{n} = mittl. Drehz. in 1/min,
 A = Rotorfläche,
 ρ = Luftdichte,
 $c_p = \frac{\text{Windradleistung } P_{wa}}{\text{theor. Windleistung } P_w}$,

$$c_p = \frac{M_o \cdot \pi \bar{n} / 30}{\rho / 2 \cdot \bar{v}^3 \cdot A}$$

Ergebnisse:

- mittlere Windgeschwindigkeit \bar{v} ,
 - mittlere Windleistung \bar{P}_w ,
- (jeweils bezogen auf den Meßzeitraum Δt).

Abb. 4: Übersicht zur Thematik des Windmeßgerätes

Entwicklung eines einfachen Anemometers
zur Klassifizierung des Windes

H.J. Friedrichs, Theodor Friedrichs & Co.



Wir sind ein mittelständisches Unternehmen, vor 28 Jahren gegründet und fertigen meteorologische Geräte und Systeme.

Im folgenden soll ein kurzer Überblick gegeben werden über das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben

"Entwicklung eines einfachen Anemometers
zur Klassifizierung des Windes"

welches in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Ulm realisiert wurde. Wir sind in der glücklichen Lage ein fertiges Produkt vorstellen zu können, da das Vorhaben, termingerecht, Ende 1980 abgeschlossen wurde.

Der zugrundegelegte Gedanke dieser Entwicklung war, mit einem einfachen, preisgünstigen Gerät, daß auch von Laien ohne weiteres gehandhabt werden kann, die Möglichkeit zu schaffen unabhängig über längere Zeiträume die Windgeschwindigkeit zu messen und zu klassifizieren. Insbesondere möchte man Aussagen erhalten über die Eignung eines Standortes für die Errichtung einer Windenergieanlage, über die optimal Auslegung eines solchen Windkonverters (Kennlinie) und über das zu erwartende Energiepotential innerhalb bestimmter Zeiträume. Aufgrund dieser Charakteristik kommen als Einsatzgebiete für das Gerät insbesondere auch Entwicklungsländer in Betracht in denen z. B. windgetriebene Bewässerungspumpen und dergleichen in größerer Zahl projektiert werden.



Im Verlauf des Jahres 1980 wurde der erste Geräteprototyp entwickelt. (B.1) Mit Rücksicht auf einfache Handhabung schien es zweckmäßig, daß Gerät in Baugruppen aufzuteilen und zwar in den Windgeschwindigkeitsgeber und die elektronische Zähleinheit. Ein Schalensternanemometer aus unserem Programm wurde geringfügig, mittels Reedkontakt modifiziert und zeichnet sich durch einen besonders einfachen Aufbau aus. Das Gehäuse des Gebers ist aus Makrolon gefertigt, wobei die beiden Gehäusenhälften zusammenschraubbar sind. Die zweifach kugelgelagerte Welle trägt die Magnetscheibe deren magnetisches Feld einmal pro Umdrehung den auf der Platine befindlichen Reedkontakt überstreicht und damit den Kontakt schließt. Da eine Umdrehung des Schalensternes exakt einem Windweg von 1,5 m entspricht, besitzt das Anemometer die

$$\text{Kennzahl } k = \frac{1 \text{ Impuls}}{1,5 \text{ m Windweg}}$$

und liefert ständig eine der Windgeschwindigkeit proportionale Frequenz. Die Impulse werden über ein Kabel von $2 \times 0,5 \text{ m}^2$ der Zähleinheit zugeführt, die sich in einem kompakten Gehäuse befindet auf dessen Aufbau wir später noch näher eingehen.

Die Aufbereitung der Impulse geschieht auf folgende Weise. (B.2) Das Anemometer liefert p-Impulse für einen Windweg s , d. h. die Kenngröße k ist $\frac{p}{s}$. Über die Zeitsteuerung mit einem Quartz als Taktgeber kann variabel eine Mittelungs-



zeit $\Delta t = 6$ oder 10 min. eingestellt werden. Der Zusammenhang zwischen mittlerer Windgeschwindigkeit V_m , Mittelungszeit Δt , Kennzahl k und Zahl der gelieferten Impulse p ist

$$V_m = \frac{p}{k \cdot \Delta t}$$

Das heißt, wenn die Windgeschwindigkeit mit einer Auflösung erfaßt werden soll, die durch je einen Zählimpuls dargestellt wird, dann muß die vom Geber gelieferte Zahl der Impulse durch den Faktor $k \cdot \Delta t$ dividiert werden.

Dieses geschieht im Teiler. Der nachfolgende Zähler summiert die Impulse auf und der erreichte Zählerstand wird alle Δt abgefragt. Eine Logikschaltung ordnet sie einer jeweiligen Windgeschwindigkeitskategorie zu, und zwar durch Ansteuerung von Rollenzählwerken der Kategorienzähler. Gleichzeitig wird mit jedem Δt ein Impuls auf den Summenzähler gegeben, der somit die Beobachtungsdauer bzw. Gesamtmeßzeit t festhält. Die Funktionskontrolle der Zähleinheit kann sehr einfach erfolgen, da der Summenzählerstand stets der Summe aller Kategoriezählerstände entsprechen muß. Die Anzahl der Kategorien wurde bei diesem Gerät auf 4 bzw. 6 Zählwerke begrenzt. Die Grenze zwischen zwei Kategorien ist in Schritten von 1 m/s kodierbar und liegt bei max. 15 m/s.

(B.3) So wäre z. B. folgende Einteilung der Kategorien denkbar:

Kategorie 1	von	0...2	m/s
Kategorie 2	von	2...4	m/s
Kategorie 3	von	4...6	m/s
Kategorie 4	von	6...8	m/s
Kategorie 5	von	8...10	m/s
Kategorie 6		≥ 10	m/s



Die Auswertung der Zählerstände nach Ablauf eines Beobachtungszeitraumes läßt sich dann sehr einfach, z. B. in Form eines Histogrammes vornehmen.

Nun zu dem mechanischen Aufbau der Zähleinheit (B.4) . Auch für die Zähleinheit wurde ein Makrolongehäuse verwendet und zwar mit Klarsichtdeckel, um ein Ablesen der Zählerstände ohne Öffnen des Gehäuses zu ermöglichen. Ganz oben ist der Summenzähler angebracht, darunter die Kategorienzähler. Alle Zählwerke sind 5-stellig und mit einer Rücksetztaste ausgestattet, so daß nach einem Beobachtungszeitraum wieder mit Null begonnen werden kann. Bei einem $\Delta t = 6$ min. ergibt sich so z. B. ein maximaler Beobachtungszeitraum von 416 Tagen. Unterhalb der Zählwerke sind die Batterien für die Stromversorgung untergebracht. Die Versorgungsspannung beträgt 6 V= für die 4 x 1,5 V Monozellen eingesetzt werden. Ein Batteriewechsel kann nach Abnehmen des Klarsichtdeckels, durch einfaches Lösen aus der Federklammer vorgenommen werden. Ein netzunabhängiger Betrieb ist somit über Monate möglich. Selbstverständlich ist bei Vorhandensein eines Netzanschlusses auch eine Versorgung über ein Netzgerät realisierbar. Entfernt man die obere Platine, auf der sich die Zählwerke und Batterien befinden, und trennt die Dual-Inline-Steckverbindung so liegt die untere Platine frei (B.5) , auf der die gesamte Steuerung, also Zeittakt, Teiler, Überspannungsschutz usw. untergebracht sind. Ferner befinden sich hier die Kodierschalter mit denen



die Mittelungszeit Δt und die Kategoriengrenzen eingestellt werden. Um diesen Bericht nicht zu umfangreich werden zu lassen, kann hier der Aufbau der Schaltung nicht in allen Details beschrieben werden. Wir verweisen aber in diesem Zusammenhang auf die von uns erstellten Abschlußberichte die erhältlich sind.

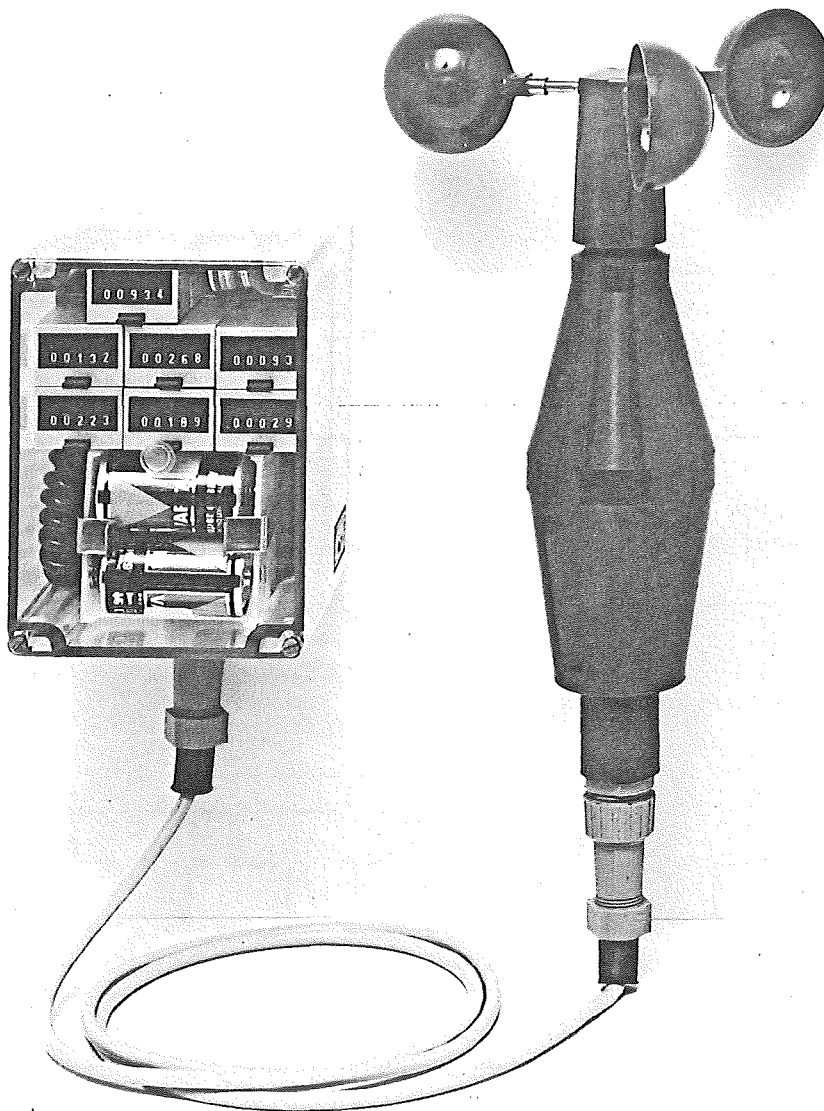
Abschließend möchten wir noch mit einigen Worten über die Entwicklungs- und Erprobungsphase des Gerätes berichten. Das Schalenkreuzanemometer wurde eingehenden Tests im Windkanal unterzogen zwecks Überprüfung des Verhältnisses „zurückgelegter Windweg zur abgegebenen Impulszahl“, d. h. $k = 1$ Impuls pro 1,5 m Windweg. Die Erprobung im Klimaschrank sollte zeigen, über welche Umgebungstemperatur das Gerät einwandfrei arbeitet. Alle Bauteile (C-MOS-Bausteine, Zählwerke usw.) waren im Hinblick auf eine möglichst weite Umgebungstemperatur von mindestens $-30^{\circ}\text{C} \dots +80^{\circ}\text{C}$ ausgesucht worden; doch zeigte sich, daß die verwendeten Trockenbatterien (Monozellen 1,5 V IEC R 20, d. h. Zink-Braunstein-Elemente) ab $+60^{\circ}\text{C}$ nicht mehr dauerhaft einsetzbar sind, da die Vergußmasse oberhalb dieser Temperatur aufzuweichen beginnt und ein Auslaufen erfolgt. Dieses Verhalten der Batterien wird auch vom Batteriehersteller so bestätigt, so daß durch diesen Test für das Gerät ein Dauer-Umgebungstemperaturbereich von $-20^{\circ}\text{C} \dots +50^{\circ}\text{C}$ festzulegen war. Bei ständigem Einsatz in der Nähe dieser Temperaturgrenzen sollte daher die ebenfalls handelsübliche Ausführung LEC LR 20 verwendet werden (Alkali-Mangan-Element), die bei der Erprobung weit größere Reserven zeigte.



Bei der Versorgung über Netzgerät kann der Einsatzbereich natürlich auf $-30^{\circ}\text{C} \dots +80^{\circ}\text{C}$ erweitert werden.

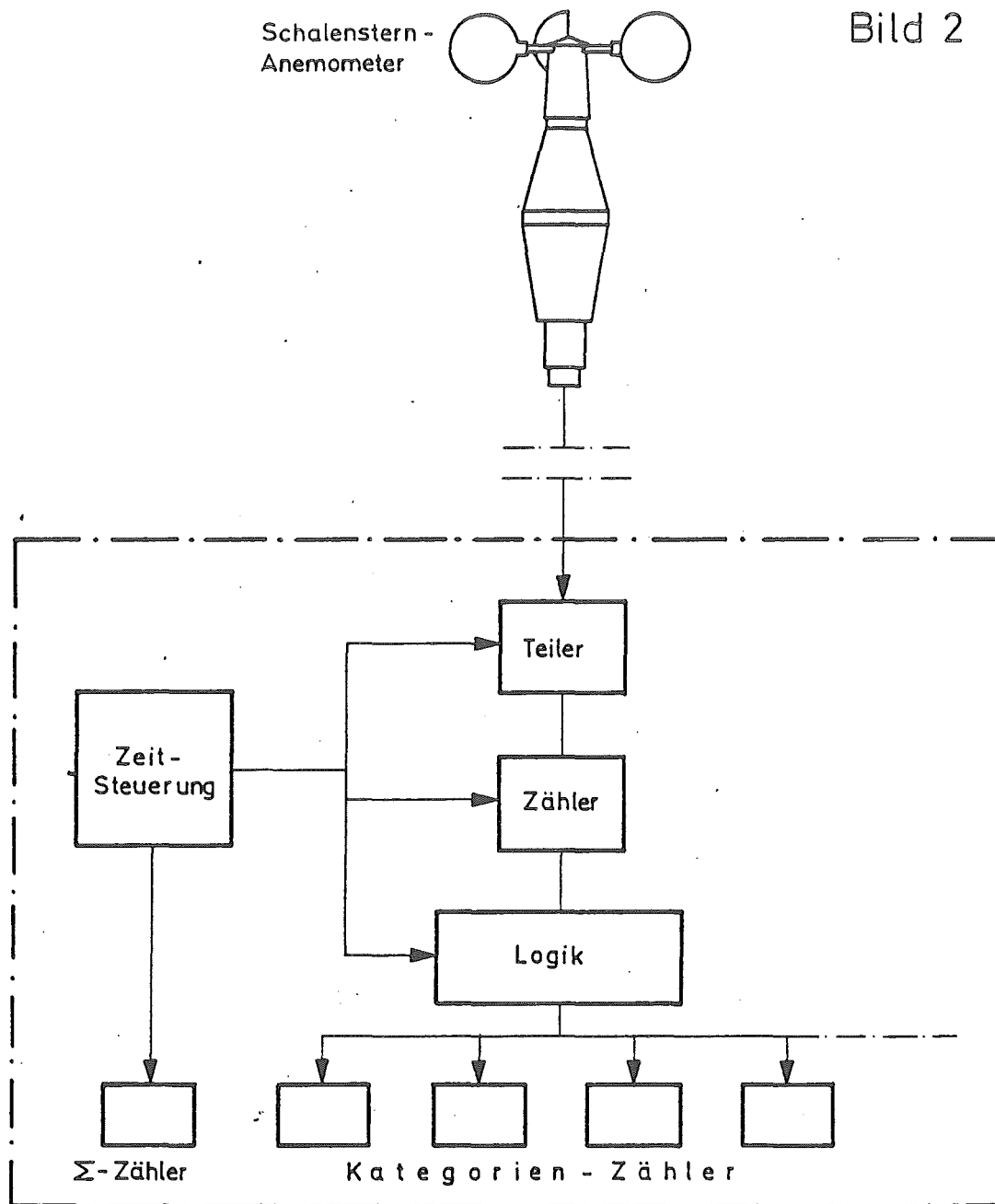
Weiterhin wurde die Zähleinheit mit dem Schalenkreuzanemometer als Gesamtsystem zunächst unter Laborbedingungen, dann im Windkanal, im Klimaschrank und im Freien erprobt. Auf diese Weise wurden alternierend Testreihen gefahren und Fehler beseitigt; Verbesserungen und Ergänzungen wurden durchgeführt, z. B. Anbringung eines Überspannungsschutzes. Ebenso konnte Aufschluß darüber gewonnen werden, welche endgültigen Leistungsspezifikationen für das Gerät festzulegen waren.

Die Erprobung des Gerätes im Freien dauert an und zeigt, daß die projektierte Mindestlebensdauer des Batteriesatzes von 4 Monaten unter hiesigen klimatischen Bedingungen weit überschritten werden kann (Lebensdauer des 1. Batteriesatzes kanpp 7 Monate, d. h. von Ende September 1980 bis Anfang Mai 1981 mit wenigen Unterbrechungen).



Schalenstern -
Anemometer

Bild 2



Unsere vorherige Zustimmung zur diese
Unterlage weder vervielfältigt nach Dritten zu-
gänglich gemacht werden und sie darf durch den
Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise
unbrauchbar verändert werden


Freimaßtoleranzen		Oberflächen		Maßstab	
Datum		Name		Blockschaltbild Windanalyzer	
Bearb.	29.4.81	Bu			
Gepr.	29.4.81	Lo			
Norm					
 Th. Friedrichs & Co.				910 560 - BL 4	
Blatt				Bl	
Zust	Anderung	Datum	Name	Norm	Urspr
Ers I		Ers d			

Bild 3

E

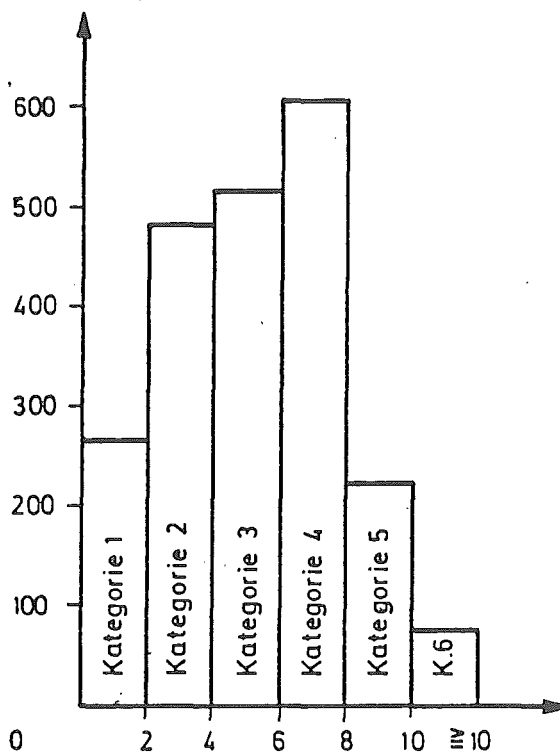
Σ-Zähler Z7
21 600

Z 1 = 2600	Z 3 = 5150	Z 5 = 2218
Z 2 = 4850	Z 4 = 6080	Z 6 = 702

Zähler -
stand

O

Dauer (h)



Auswertung

A

Windgeschwindigkeit $V \left[\frac{m}{s} \right]$

Wir erteilen unsere vorherige Zustimmung, dass diese Unterlage weder vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht werden, und sie darf durch den Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise mitteilbarlich verwendet werden.

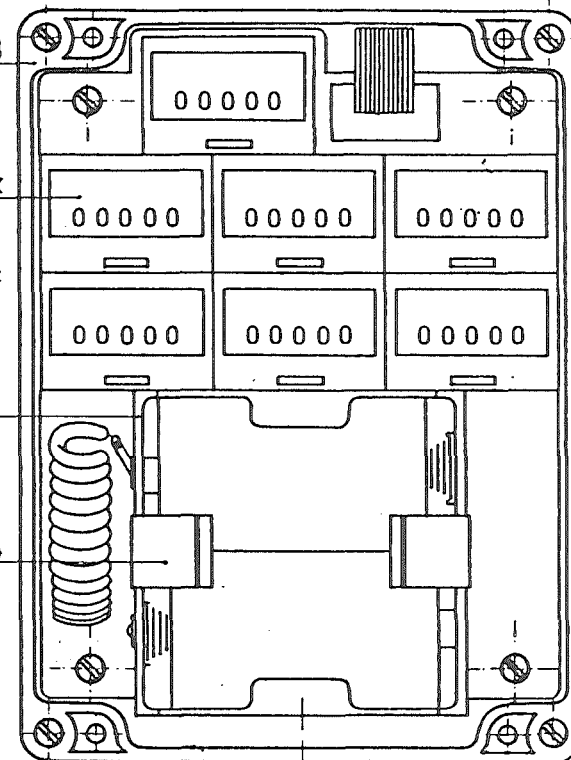
Firma		Fremdabmessungen		Oberflächen		Maßstab			
Datum		Name		Zählerstand - Auswertung					
Bearb.		30.4.81						Ku	
Gepr.									
Norm									
Zust.		Anderung		Datum		Name			
Urspr.		Ers. I		Ers. d		Blatt			
Th. Friedrichs & Co.		910 560-SK 4				Bl.			


80

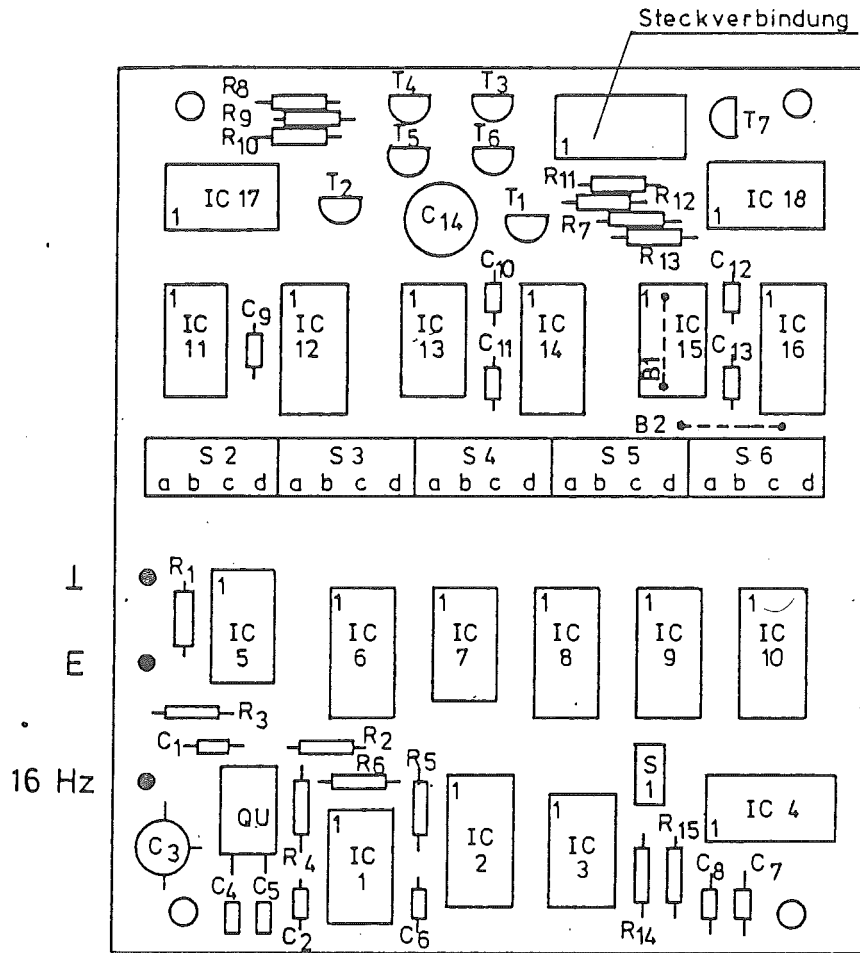


Steckverbindung

4880.0010-EZ4



					Freßmaßtoleranzen		Oberflächen	
							Maßstab 1:1	
							Windweg - Zähleinheit	
					Datum	Name		
				Bearb.	5.2.81	Bx		
				Gepr.	6.2.11	Lo		
				Norm.				
							4880.0001 - ZG 3	
					 FTH FRIEDRICHS		Blatt B1	
Zust.	Änderung	Datum	Name	Norm	Urspr	Ers I		



Achtung: Verschiedene Bauteile bzw.
Brücken entfallen bei
einzelnen Varianten
(Stücklisten beachten!)

Freimaßtoleranzen

Oberflächen

Maßstab 1:1

	Datum	Name
Bearb.	Jan. 81	Fritz
Gepr.		
Norm		

Bestückungsplan

Steuerplatine



Th. Friedrichs & Co.

4880. 0015- BK 4

Blatt

Bl

Zust Änderung Datum Name Norm Urspr

Ers f

Ers d

„Diese“ unserer vorherige Zustimmung an diese
Unterlage weder vervielfältigt noch Dritten zu-
ganglich gemacht werden, und sie darf durch den
Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise
unbrauchbar verändert werden

Bordgebundenes Verfahren zur Messung
von Scherwindgradienten

G. Neuwerth, R. Hartel, RWTH Aachen



Das Auftreten von Windscherungen bedeutet für Flugzeuge insbesondere während der Start- und Landephase eine erhebliche Beeinträchtigung der Sicherheit, da sich beim Flug durch eine Windscherung sowohl Änderungen im Auftrieb als auch Störungen im Momentenhaushalt ergeben. Hier soll ein einfaches Meßverfahren zur Bestimmung von lokalen Scherwindgradienten an Bord von Flugzeugen vorgestellt werden. Es kann für Zwecke der Flugführung, aber auch für meteorologische Messungen verwendet werden.

Bei diesem Verfahren wird die Differenz der Staudrücke - am Flugzeug in zwei Punkten mit vertikalem Abstand gemessen - als Maß für den Scherwindgradienten bestimmt. Die Messung erfolgt in der Weise, daß zwei Pitotrohre mit vertikalem Abstand h durch eine Schlauchleitung verbunden werden. Liegt eine Staudruckdifferenz zwischen den Pitotrohren (Unterschiede im statischen Druck wirken sich nicht aus), so wird die Schlauchleitung durchströmt. Die Strömungsgeschwindigkeit wird mit einer speziellen Hitzdrahtsonde gemessen und ist ein Maß für den Staudruckgradienten $\frac{\Delta q}{\Delta h}$, der sich durch einen etwaigen Scherwind ergibt.

Das Meßverfahren wurde mit Hilfe eines Flugzeugs vom Typ MORANE Rallye 180 Commodore erprobt. Bei Meßflügen, bestehend aus Landeanflügen, anschließendem Durchstarten und Abfliegen, konnten nach dem genannten Verfahren die jeweiligen Windgeschwindigkeitsprofile der Bodengrenzschicht gewonnen werden. Die hierbei gemessenen Scherwindgradienten waren in guter Übereinstimmung mit den Werten, die mit Hilfe eines bodengebundenen Meßaufbaus am gleichen Ort ermittelt wurden.

Gliederung

	Seite
1. Einleitung	60 - 1
2. Beschreibung der Scherwindfelder	60 - 2
3. Prinzip eines einfachen Scherwind-Meßsystems	60 - 2
4. Versuchshilfsmittel zur Durchführung von Flugversuchen	
4.1 Einbau des Meßsystems in die verwendeten Flugzeuge ...	60 - 5
4.2 Meßaufbau zur Ermittlung des Höhenruderwinkels, der Nickwinkel- und der Vertikalgeschwindigkeit	60 - 6
4.3 Bodengebundene Scherwindmeßeinrichtung	60 - 6
4.4 Eichung des bordgebundenen Scherwindmeßsystems	60 - 6
5. Ergebnisse der Versuchsflüge	
5.1 Einfluß von Bewegungen des Flugzeuges auf das Sondensignal des Scherwindmeßsystems	60 - 8
5.2 Frequenzspektrum der Sondensignale des Scherwind- meßsystems	60 - 10
5.3 Vermessung von Windprofilen der Bodengrenzschicht mit dem Scherwindmeßsystem	60 - 11
5.4 Vergleich der Ergebnisse der bord- und boden- gebundenen Scherwindmeßeinrichtung	60 - 13
6. Zusammenfassung	60 - 13

Bordgebundenes Verfahren zur Messung von Scherwindgradienten

1. Einleitung

Änderungen der horizontalen Windgeschwindigkeitskomponente mit der Höhe werden als Scherwinde bezeichnet. Sie entstehen durch Impulsaustausch in der bodennahen Grenzschicht und sind erfahrungsgemäß besonders intensiv beim Zusammentreffen von Kalt- und Warmluftfronten, in der Nähe von Gewittern oder an Inversionsschichten.

Das Auftreten von Windscherungen bedeutet für Flugzeuge insbesondere während der Start- und Landephase eine erhebliche Beeinträchtigung der Sicherheit, da beim Flug durch eine Windscherung der Gleichgewichtszustand des Flugzeugs gestört wird. Der Pilot muß für eine richtige Reaktion die Ursache dieser Störungen erkennen und entsprechende Steuermaßnahmen zur Korrektur des Flugzustandes einleiten. Besonders wichtig ist eine schnelle und richtige Maßnahme im Landeanflug; Nichterkennen einer Windscherung oder zu späte Reaktion des Piloten bewirken in niedriger Höhe eine erhebliche Gefährdung insbesondere durch zu frühe Bodenberührung. So sind eine Reihe von Flugunfällen der Wirkung von Scherwinden zugeschrieben worden.

Auch für den Flugzeugführer von Leichtflugzeugen - diese sollen hier im wesentlichen betrachtet werden - können meteorologische Grenzsituationen eine große Beanspruchung oder Überforderung bringen (s. HERZAU /1/).

Das dem Piloten vertraute Verhalten des Flugzeuges kann sich bei Scherwinden extrem verändern. Die Grundinstrumentierung (Fahrtmesser, Höhenmesser, Variometer, Horizont) liefert dem Piloten dabei keine unmittelbaren Informationen über die Einwirkung von Scherwind.

Zur bordgebundenen Messung von Scherwinden sind verschiedene Ansätze gemacht worden. An Bord aller neueren Verkehrsflugzeuge sind Trägheitsnavigationssysteme (Inertial Navigation Systems, INS) vorhanden. Diese liefern eine Information über die Bahngeschwindigkeit V_K . Durch Vergleich dieser inertialen Größe mit der Geschwindigkeit der Anströmung läßt sich die Windgeschwindigkeit ermitteln. KRAUSPE /2/ beschreibt die hierzu notwendige zusätz-

liche, luftfahrttaugliche Datenverarbeitungsanlage. Sie soll in einem Meßprogramm an Bord eines Airbus A 300 der Deutschen Lufthansa überprüft werden; dieses Verfahren liefert jedoch nur Information über den lokalen Scherwind im Steig- oder Sinkflug. Der Meßaufbau erfordert einen beträchtlichen Kosten- und Arbeitsaufwand.

Entsprechende Verfahrensvorschläge existieren bereits und werden von U.S. Avionik-Herstellern auf ihre Realisierbarkeit untersucht. Eine wichtige Frage ist dabei, welche Anzeigewerte für den Flugzeugführer nützlich sind und auf welchem Gerät und in welcher Form sie darzustellen wären, oder ob sie direkt in das Flugregelungssystem eingegeben werden müssten, um noch eine rechtzeitige Reaktion auszulösen (s. FREDERIKSON /3/ und COX /4/). Bei Flugzeugen, die nicht mit einer INS - Anlage ausgerüstet sind, schlägt WÜST /5/ folgendes Verfahren vor: die durch Wind hervorgerufenen Änderungen des Anstellwinkels lassen sich indirekt ermitteln unter Verwendung von Gleichungen der Flugmechanik und von Sensoren wie Lotkreisel, Beschleunigungsmesser, Luftdatenrechner. JOPPA /6/ schlägt eine andere indirekte Methode zur Aussage über die Scherwinde vor, bei der zusätzlich zur Sinkrate die Totalenergie des Flugzeugs mittels einer speziellen Sonde gemessen wird.

Eine weitere Möglichkeit, Scherwinde zu messen, ist die Anwendung der Laser - Doppler - Anemometrie. MAINONE und BOUIS /7/ haben einen gepulsten Farbstofflaser an Bord eines Flugzeuges eingesetzt und messen hiermit die Luftgeschwindigkeit außerhalb des Flugzeugs.

Verfahren, die mit geringerem Aufwand vom Flugzeug aus eine Scherwindmessung ermöglichen und damit auch in kleineren Flugzeugen Verwendung finden könnten, wären sehr wünschenswert. Ausgangspunkt für die vorliegende Arbeit war die Idee für ein einfaches, bordgebundenes Verfahren zur Messung von Scherwindgradienten. Bei diesem Verfahren dient die Differenz von Gesamtdrücken - gemessen an zwei Flugzeugpositionen mit vertikalem Abstand - als Maß für den lokalen Scherwind. Das Meßver-

60-2

fahren sollte entwickelt und in Flugversuchen erprobt werden. Es kann verwendet werden, um dem Piloten Scherwindgradienten zur Anzeige zu bringen, so daß er Steuermaßnahmen augenblicklich einleiten kann - dies ist ein entscheidender, die Sicherheit erhöhender Effekt. In der Arbeit sollen weiterhin die Pilotenreaktionen bei Einwirkung von Scherwinden ermittelt und mit in Simulationen gewonnenen optimalen Reaktionen eines Modellpiloten verglichen werden.

2. Beschreibung der Scherwindfelder

Die Luftbewegung läßt sich als zeitlich und örtlich veränderliches Vektorfeld beschreiben, durch das sich das Flugzeug hindurchbewegt. Im allgemeinen Fall liegen 3-dimensionale Vektorfelder vor, es gibt Windgeschwindigkeitskomponenten u_W und v_W in der horizontalen Ebene und w_W in vertikaler Richtung, die auf ein Flugzeug einwirken. Es wird zunächst die übliche Annahme gemacht, daß das Windfeld "eingefroren" ist, d.h. in dem Zeitintervall, in dem das Flugzeug das Windfeld passiert, tritt keine zeitliche Änderung des Geschwindigkeitsvektors auf. Weiterhin kann man in bodennahen Luftmassen die vertikale Windgeschwindigkeitskomponente w_W meist vernachlässigen. Dies trifft in dieser Arbeit zu, weil hauptsächlich Landeanflüge und Startvorgänge in Flughöhen unterhalb 1000 ft untersucht wurden. Diese Flugbewegungen werden zudem überwiegend mit Gegenwind oder Rückenwind durchgeführt. Dadurch tritt auch keine wesentliche Windgeschwindigkeitskomponente v_W quer zur Flugrichtung auf. Es bleibt demnach nur die Windkomponente u_W übrig, die sich mit der Höhe z und der x -Komponente des geodätischen Koordinatensystems ändert (s. Bild 2.1)

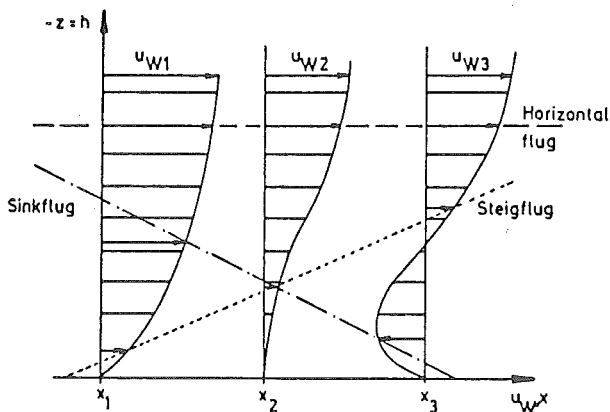


Bild 2.1 Darstellung der Windgeschwindigkeitskomponente u_W in der $x-z$ Ebene.

Der Verlauf von u_W als Funktion der Höhe h stellt das Windprofil dar, wobei der Gradient du_W/dh ein Maß für die Windscherung ist. In dem begrenzten Raum, in dem Start- und Landevorgänge erfolgen, kann häufig die Abhängigkeit des Scherwindprofils von der Koordinate x vernachlässigt werden. Durchfliegt ein Flugzeug beim Steig- oder Sinkflug ein Scherwindprofil, so erfährt es eine zeitliche Änderung der aerodynamisch wirksamen Anströmgeschwindigkeit: du_W/dt . Es gilt nämlich

$$\frac{du_W}{dt} = \frac{du_W}{dh} \frac{dh}{dt}$$

Hieraus ist ersichtlich, daß die Scherwindwirkung sowohl mit zunehmender Sink- bzw. Steiggeschwindigkeit \dot{h} als auch mit anwachsendem Scherwindgradienten du_W/dh verstärkt wird. Der Pilot hat durch das Variometer zwar Kenntnis über die Vertikalgeschwindigkeit; über den Scherwindgradienten hat er jedoch keinerlei Informationen. Diese Größe muß zusätzlich gemessen und angezeigt werden, damit der Pilot die Ursache von Anstellwinkel- und Staudruckänderungen frühzeitig erkennen und aussteuern kann. Ein einfaches Meßprinzip zur Bestimmung des Scherwindgradienten wird im folgenden Abschnitt eingeführt.

3. Prinzip eines einfachen Scherwind-Meßsystems

Ausgangspunkt des in dieser Arbeit näher untersuchten Verfahrens zur Bestimmung von lokalen Scherwindgradienten war der Gedanke, daß ein Scherwindgradient zu unterschiedlichen Gesamtdrücken - in verschiedenen vertikalen Positionen - am Flugzeug führt. Werden nun Messungen des Gesamtdrucks an zwei verschiedenen Positionen (1 und 2) mit dem vertikalen Abstand Δh durchgeführt, so ergeben sich bei einem Scherwindprofil gemäß Bild 3.1 folgende Werte der Gesamtdrücke in Position 1 bzw 2

$$p_{g1} = p_1 + \frac{\rho_1}{2} (V + \Delta u_{W1})^2$$

$$p_{g2} = p_2 + \frac{\rho_2}{2} (V - \Delta u_{W2})^2$$

V ist dabei die von einem Staudruckmesser (vertikale Position beliebig) zu ermittelnde resultierende Anblasgeschwindigkeit (Fahrt)

Als Differenz der Gesamtdrücke erhält man - bei Linearisierung der Zustandsänderungen im Bereich Δh -:

$$(3.1) \quad \Delta p_g = p_{g1} - p_{g2} = \frac{dp}{dh} \Delta h + \frac{1}{2} \frac{d\rho}{dh} \Delta h V^2 + \rho V \frac{du_W}{dh} \Delta h$$

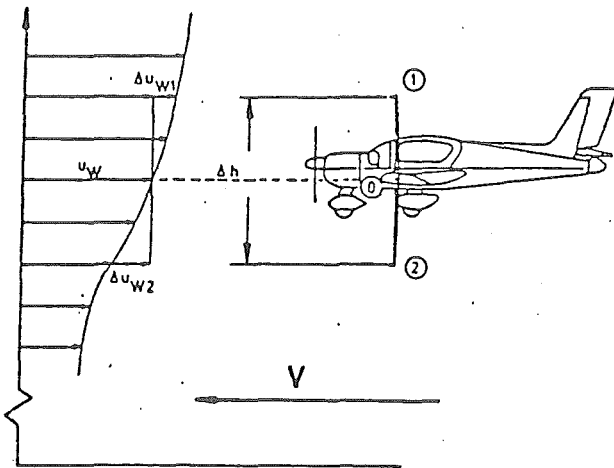


Bild 3.1 Zum Scherwind - Meßprinzip

$$\text{mit} \quad \Delta u_{W1} + \Delta u_{W2} = \Delta u_W = \frac{du_W}{dh} \Delta h$$

$$\text{und} \quad \frac{1}{2} (\rho_1 + \rho_2) = \rho.$$

Auf die Gesamtdruckdifferenz hat also nicht nur der Scherwindgradient einen Einfluß sondern auch die Änderungen des statischen Druckes und der Dichte mit der Höhe. Der erste Summand in Gleichung 3.1, der die Höhenabhängigkeit des statischen Druckes enthält, kann durch folgenden Aufbau des Meßsystems eliminiert werden: zwei Pitotrohre (an den Positionen 1 und 2) werden durch eine Schlauchleitung verbunden und die Druckdifferenz wird an einer Stelle innerhalb des Schlauches gemessen. Auf diese Weise kann die Differenz der statischen Drücke durch die Luftsäule im Schlauch kompensiert werden. Die an einer Stelle in der Schlauchleitung gemessene Druckdifferenz Δp_L ist demnach gleich der Differenz der Staudrucke:

$$\Delta p_L = q_1 - q_2 = \frac{dq}{dh} \Delta h$$

Bei bekanntem Abstand der Meßorte Δh liefert die Messung also

$$(3.2) \quad \frac{dq}{dh} = \frac{\Delta p_L}{\Delta h}$$

Bei jeder Höhenänderung (Steig- oder Sinkflug) würde das Flugzeug also eine Änderung des Staudrucks erfahren, wenn Δp_L von Null verschieden ist. Diese Staudruckänderung tritt auf, auch ohne daß das Flugzeug in Flugrichtung beschleunigt oder verzögert wird (Ein derartiger Einfluß überlagert sich der Staudruckänderung gemäß (3.2)).

Die Größe Δp_L liefert also eine wichtige Information, weil insbesondere eine Staudruckabnahme im Bahnneigungsflug die Reserve gegen Überziehen des Flugzeugs mindert und vom Piloten durch Schuberrhöhung kompensiert werden muß; Δp_L ist ein Maß für die erforderliche Schuberrhöhung.

Gl. 1 zeigt, daß Δp_L aus zwei Anteilen besteht; es gilt dann also

$$\frac{dq}{dh} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dh} q + \rho V \frac{du_W}{dh}$$

$$\text{mit} \quad q = \frac{\rho}{2} V^2 = \text{mittlerer Staudruck}$$

oder als Ausdruck für die prozentuale Änderung von q

$$(3.3) \quad \frac{1}{q} \frac{dq}{dh} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dh} + \frac{2}{V} \frac{du_W}{dh}$$

Der erste Term führt auch bei statischer Atmosphäre zu einer Änderung des Staudrucks im Bahnneigungsflug. Von extremen Wetterbedingungen abgesehen, ist dieser Ausdruck klein und führt im Landeanflug i.a. zu einer - gegen Überziehen günstigen - Erhöhung des Staudrucks. Bei Zugrundlegung einer Normatmosphäre gilt in Bodennähe

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dh} = 1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{m}$$

d.h. beim Durchfliegen einer Höhendifferenz von 100 m ändert sich der Staudruck aus diesem Term nur um 1%. Von ungewöhnlichen atmosphärischen Schichtungen abgesehen - die von Meßprinzip jedoch erfaßt würden - stammen die wesentlichen, u.U. gefährlichen Einflüsse aus dem zweiten Term von Gl. (3.3), der vom Scherwindgradienten abhängt. Der Scherwind einfluß wird mit abnehmender Landegeschwindigkeit V verstärkt, betrifft also kleinere Flugzeuge in stärkerem Maße. Als Größenordnung ergab sich bei dem in der Untersuchung verwendeten Flugzeug mit einer Fluggeschwindigkeit $V = 33 \text{ m/s}$ und Scherwindgradienten von $0.05 \frac{\text{m/s}}{\text{m}}$ (s. z.B. /7/):

$$(3.4) \quad \frac{2}{V} \frac{du_W}{dh} = 3 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m}$$

Dieser Wert liegt also um den Faktor 30 über dem Wert des Dichteterms; 100 m Höhendifferenz bedeuten nun eine Änderung des Staudrucks um 30% (!).

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß das oben skizzierte neue Meßprinzip grundsätzlich in der Lage ist, die durch die meteorologischen Zustände der Dichteschichtung und des Scherwindes bedingten Einflüsse auf die Staudruckänderungen bei Steig- und Sinkflügen zu erfassen. Dabei überwiegt der Einfluß von Scherwindgradienten i.a. denjenigen der Dichteschichtung erheblich. Aus diesem Grunde wäre das neue Meßprinzip auch zur einfachen, schnellen Vermessung von Scherwindfeldern für Flugtechnik und Meteorologie von erheblichem Interesse. Aus den Gl. (3.2) - (3.4) folgt nämlich

$$(3.5) \quad \frac{du_W}{dh} = \frac{1}{\rho V} \frac{\Delta p_L}{\Delta h}$$

Als nächster Schritt ist nun darzulegen, wie und mit welcher Genauigkeit die Druckdifferenz Δp_L gemessen werden kann. Da der maximale vertikale Abstand der Gesamtdruckmeßsonden doch recht begrenzt ist - insbesondere bei kleineren Flugzeugen (beim verwendeten Versuchsträger war $\Delta h = 4\text{ m}$) - sind nur sehr geringe Werte von Δp_L zu erwarten. Aus Gl. (3.5) folgt mit $V = 33\text{ m/s}$ und $\Delta h = 4\text{ m}$:

$$(3.6) \quad \Delta p_L = \frac{2}{V} \frac{du_H}{dh} q \cdot \Delta h = 8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Eine derartige kleine Druckdifferenz kann natürlich nicht mehr durch Differenzbildung aus zwei Druckmessungen ermittelt werden; allerdings sind auch Präzisionsdruckmeßgeber (Betz- oder Schrägrohrmanometer) bei einer Auflösung von $2 - 5\text{ N/m}^2$ nicht ausreichend, abgesehen davon, daß sie für einen Einsatz im Flugzeug nicht in Frage kommen, da Schwerkrafteinflüsse, Beschleunigungen und Vibrationen keine sinnvolle Druckanzeige ermöglichen. Elektrische Druckaufnehmer sind bekannt mit einer Auflösung bis herab zu etwa 10 N/m^2 . Auch hier wird es schwer sein, unter den Bedingungen beim Flugzeugeinsatz verlässliche Werte zu messen.

Einen Ausweg bot nun die Idee zu folgendem Meßverfahren: Bei einer anliegenden Druckdifferenz wird die Leitung zwischen den beiden Pitotrohren durchströmt, wobei die Strömungsgeschwindigkeit u proportional zum angelegten Druck ist, d.h. auch proportional zu Δp_L ist, wenn die Rohrströmung laminar ist; auch in dieser Beziehung ist nämlich der Einfluß der statischen Druckunterschiede eliminiert. u ist somit ein Maß für den Scherwindgradienten. Der prinzipielle Meßaufbau ist in Bild 3.2 dargestellt. Beim Flugversuch betrug die Leitungslänge $l = 5\text{ m}$ und der Innendurchmesser $4\text{ mm} = 2R$.

Geht man von einer laminaren Durchströmung der Leitung

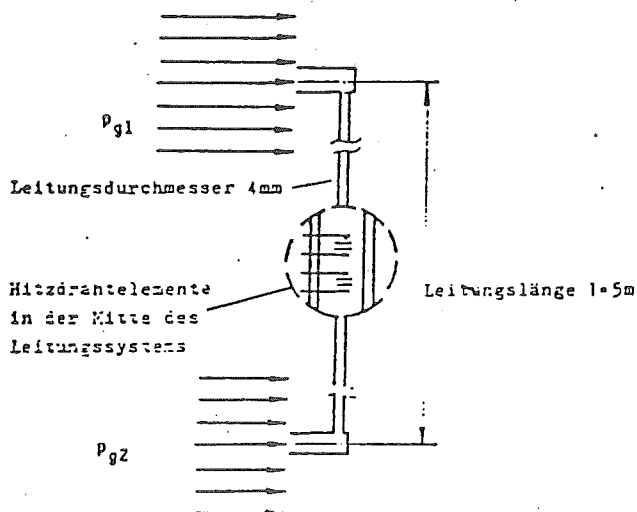


Bild 3.2 Prinzip des Meßaufbaus

aus, so erhält man für das Medium Luft im Schlauch folgenden Geschwindigkeitsverlauf:

$$u(r) = \frac{\Delta p_L}{4\mu} (R^2 - r^2)$$

Bei einer Druckdifferenz $\Delta p_L = 8\text{ N/m}^2$ erhält man in der Mitte der Leitung ($r = 0$) eine Durchströmungsgeschwindigkeit $u_{\text{max}} = 9\text{ cm/s}$. Die Reynoldszahl beträgt mit der über den Schlauchquerschnitt gemittelten Geschwindigkeit $\bar{u} = 1/2 u_{\text{max}}$

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot \bar{u} \cdot 2 \cdot R}{\mu} = 12.3$$

Da die Reynoldszahl wesentlich kleiner als die kritische Reynoldszahl für Rohrströmungen ist, kann mit laminarer Rohrströmung gerechnet werden.

Zur Messung auch kleinerer Strömungsgeschwindigkeiten - wie sie in der Schlauchleitung auftreten - eignet sich besonders die Hitzdrahtmeßtechnik, wie sie bei Strömungsuntersuchungen häufig angewendet wird.

Bei der Messung der Scherwindgradienten kommt es nun nicht auf kurze Ansprechzeiten der Sonde an, sondern auf eine hohe Empfindlichkeit bei kleinen Geschwindigkeiten. Deshalb ist es zweckmäßig, Hitzdrähte mit großer Oberfläche einzusetzen, wobei die größere Masse und damit Wärmekapazität in Kauf genommen werden kann. Bei den Flugversuchen kam eine spezielle Hitzdrahtsonde (System Westerboer) zum Einsatz (s. Bild 3.3).

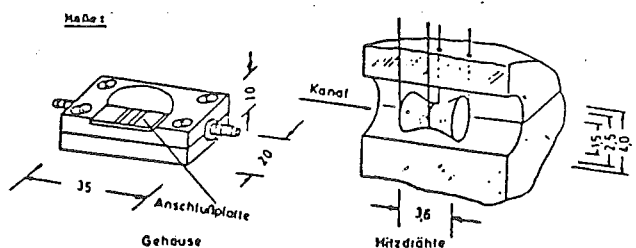


Bild 3.3 Schnitt durch Meßsonde mit Hitzdrahtelementen

Bei dieser Sonde sind in einem Metallgehäuse innerhalb eines Kanals (Innendurchmesser 4 mm) zwei spiralförmig gewickelte Hitzdrähte angebracht. Die Luft strömt über die hintereinanderliegenden Hitzdrähte durch den Kanal. Je größer die Geschwindigkeit ist, umso stärker werden die durch einen elektrischen Stromfluß erhitzten Drähte gekühlt. Die Hitzdrähte sind hierbei an einen Regelkreis angeschlossen, der entsprechend dem Konstant-Temperatur-Verfahren (CTA) arbeitet; d.h. der Stromfluß wird so geregelt, daß der Widerstand und damit die Temperatur der Hitzdrähte konstant bleibt. Die Spannung an der Sonde, die für den jeweiligen elektrischen Strom notwendig ist, ist somit ein Maß für die Geschwindigkeit. Ein besonderer

Effekt wurde durch die zwei hintereinanderliegenden Hitzdrähte erreicht:

Luffteilchen, die das erste Hitzdrahtelement passiert haben, sind angewärmt und kühlen den zweiten Hitzdraht weniger stark. Je nach Strömungsrichtung tritt also eine definierte Widerstandsdifferenz zwischen den beiden Hitzdrähten auf. Somit kann durch eine elektronische Zusatzschaltung die Strömungsrichtung zusätzlich zur Strömungsgeschwindigkeit gemessen werden.

4. Versuchshilfsmittel zur Durchführung von Flugversuchen

4.1 Einbau des Meßsystems in die verwendeten Flugzeuge

Nachdem in Vorversuchen mit dem Flugzeug Sperber RF 5B gezeigt werden konnte, daß mit dem gewählten Meßprinzip reproduzierbare Scherwindsignale erhalten werden, wurde das Scherwindmeßsystem mit vergleichsweise wesentlich größerem Aufwand in den eigentlichen Versuchsträger, das mit Landesmitteln beschaffte Flugzeug MORANE Rallye 180 Commodore, eingebaut. (Dieses Flugzeug dient der FH - Aachen und der RWTH zur gemeinsamen Nutzung im Rahmen von Lehre und Forschung).

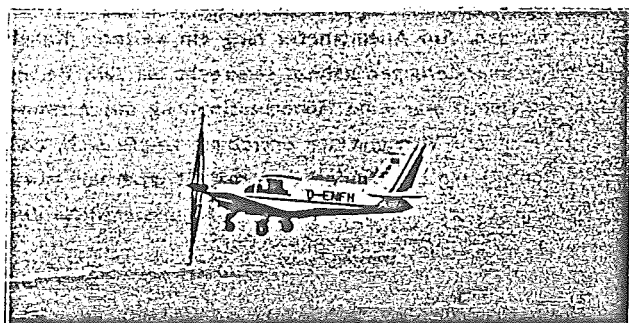


Bild 4.1 Meßflugzeug MORANE mit eingebauter Scherwindmeßausrüstung

Mit dem Versuchsaufbau in diesem Flugzeug sollten quantitative Messungen von Scherwindgradienten erzielt werden.

Zum Einbau einer Gerätebox mit dem Scherwindmeßsystem waren größere bauliche Veränderungen im linken Außenflügel der MORANE vorzunehmen. Die Gerätebox (Bild 4.2) wurde innerhalb des linken Flügelrandbogens untergebracht. In dieser Box ist außer der Hitzdrahtsonde (inkl. Elektronik) eine drehbare Welle eingebaut, die aus dem Kasten herausragt und auf die ein mit den beiden Pitotrohren ausgerüsteter 4 m langer Ausleger (s. Bild 3.1 und 4.1) aufgesteckt werden kann.

Ein Elektromotor mit einem rotierenden Kurbelzapfen bewegt über einen Hebel die zweifach gelagerte Welle in

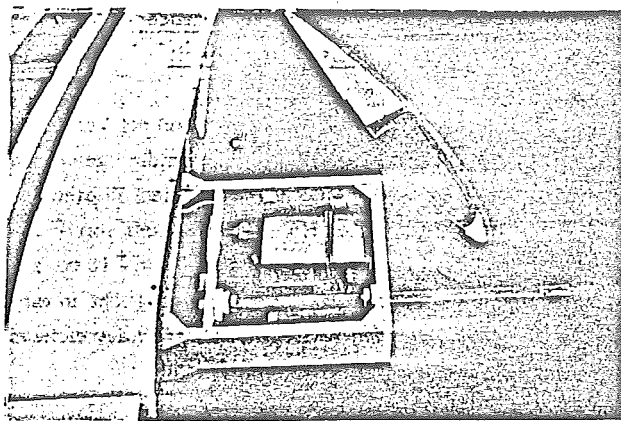


Bild 4.2 Am Flügel montierte Gerätebox und - noch nicht befestigter - neuer Randbogen

einem Winkelbereich von 90° . Diese Drehung der Welle bewirkt eine Schwenkbewegung des Auslegers von der rumpfparallelen Lage (bei Start und Landung) in eine zur Flugbahn praktisch senkrecht gerichtete Lage.

Diese wird während des Meßfluges eingenommen. Bei einem Störfall in der Bewegungsmechanik der Schwenkvorrichtung kann mit einer Reißleine die Verbindung Elektromotor - Welle entkoppelt werden. Hierdurch wird der Ausleger über eine eingebaute Feder in die Rumpfparallele Lage zurückgeführt so daß bei der Landung keine Bodenberührung des Auslegers auftritt.

Zur Anordnung der Gerätebox (Bild 4.2) innerhalb des linken Randbogens mußte ein neuer Randbogen gebaut werden, der die notwendigen Aussparungen aufweist. Die Kräfte von Gerätebox und Ausleger werden nicht auf den Randbogen sondern auf vier Anschlußpunkte übertragen, die an der Trennstelle zwischen Flügel und Randbogen liegen. Hierzu mußte die Außenrippe des Flügels versteift werden - unter anderem wurde eine Stegverbindung bis zur nächsten Rippe eingietet. Bild 4.2 zeigt auch den neuen Randbogen, der über die Box gesteckt und mittels Schnellverschlüssen am Flügel befestigt wird. Die elektrischen Leitungen zwischen Gerätebox und Cockpit wurden durch ein im Flügel integriertes Leerrohr geführt. Alle bautechnischen Veränderungen an der MORANE wurden durch einen luftfahrttechnischen Betrieb (H. Gornitzig, Wuppertal) durchgeführt. Das Luftfahrt - Bundesamt hat nach Versuchsflügen die Genehmigung für Meßflüge im Rahmen einer "Zulassung einer großen Änderung an einem Stück nach § 41 Luft Ger PO" erteilt. Während der gesamten Versuchsphase mit der umgerüsteten MORANE traten keine technischen Störungen auf.

4.2 Meßaufbau zur Ermittlung des Höhenruderwinkels, der Nickwinkel- und der Vertikalgeschwindigkeit

Zur Erfassung der Pilotenreaktionen während der Versuchsflüge sollte die Höhenruderstellung ständig gemessen werden. Bei dem Flugzeug MORANE steht dem Piloten zur Aussteuerung des maximalen Höhenruderwinkels von $\pm 15^\circ$ eine Translationsbewegung des Steuerhorns von ± 10 cm zur Verfügung. Diese Translationsbewegung ermöglicht in einfacher Weise eine für den vorliegenden Zweck ausreichend genaue Aussage über die Höhenruderstellung:

Zur Ermittlung der Drehgeschwindigkeit des Flugzeugs um die Querachse wurde ein Wendekreisler vom Typ GR - G5 AH 7 - 88A der Firma Northrop Nortronics installiert.* Als Versorgungsspannung benötigt das System eine Wechselspannung von 26 V mit 400 Hz.

Zur Erzeugung dieser Versorgungsspannung aus dem Bordnetz des Versuchsflugzeuges (12 Volt Gleichspannung) mußte ein Umformer entworfen und gebaut werden.

Das Meßsignal fällt in Form einer Wechselspannung von 400 Hz an, wobei die Amplitude proportional zur Winkelgeschwindigkeit ist. Um mit einem an Bord befindlichen Bandgerät eine der Winkelgeschwindigkeit proportionale Gleichspannung aufzeichnen zu können, mußte die Ausgangsspannung des Wendekreislers zunächst verstärkt, über einen Brückengleichrichter gleichgerichtet und anschließend durch einen Kondensator geglättet werden. Die Glättung hatte die zusätzliche wichtige Wirkung, daß die Vibrationen des Flugzeuges nicht angezeigt wurden. Durch verschiedenen Arten der Aufhängung des Kreiselsystems war es nämlich nicht gelungen, eine Entkopplung von den durch den Motor angeregten Schwingungen des Cockpits zu erreichen. Es wurde eine Halterung gebaut, die eine derartige Positionierung des Wendekreislers ermöglichte, daß ausschließlich die Nickgeschwindigkeit $\dot{\theta}$ angezeigt wurde. Die Eichung des Kreisels mit der gesamten Meßkette erfolgte mit Hilfe einer elektromotorisch angetriebenen drehenden Scheibe.

Zur Erfassung der Fluggeschwindigkeit, der Höhe und der Höhenänderung wurde ein Gerät der Fa. Peschges verwendet. Das hierin enthaltene Variometer arbeitet bei der Messung der statischen Drücke mit piezoresistiven Halbleiterdruckaufnehmern. Das Signal dieser Druckaufnehmer

wird differenziert, um die Steig- oder Sinkrate zur Anzeige zu bringen.

Auf der Rückbank im Cockpit befand sich ein im ILR eigens entwickeltes Kombigerät. Es enthält neben den Meßwertgebern für Staudruck und statischen Druck alle elektronischen Baugruppen, die für die Versorgung und Anpassung der verschiedenen Meßsignale notwendig sind. Mit einem vierspürigen Kassettenbandgerät wurden ständig die folgenden Signale während der Meßflüge aufgezeichnet: Höhenruderwinkel η , Steig- bzw. Sinkrate H , Staudruckdifferenz Δp_L und Nickwinkelgeschwindigkeit $\dot{\theta}$.

4.3 Bodengebundene Scherwindmeßeinrichtung

Zur Überprüfung der bordgebundenen Scherwindmessung beim Flug in geringen Höhen wurde gleichzeitig eine zweite, bodengebundene Scherwindmessung durchgeführt. Unter vier gekoppelten mit Helium gefüllten Ballonen wurde ein Schalenkreuzanemometer gehängt, welches die horizontale Windkomponente erfaßt. Die Meßwerte wurden über ein dünnes 2-adriges Kabel zum Boden übertragen, welches gleichzeitig als Halteleine diente. Mittels dieser Halteleine konnten die Ballone in unterschiedlicher Höhe fixiert werden. Am Anemometer hing ein weiteres Kabel mit Längenmarkierungen nahezu senkrecht bis zum Boden herunter. Damit war eine Höhenbestimmung des Anemometers möglich. Während der Erprobung zeigte sich, daß ein Ballonaufstieg bei Windgeschwindigkeit unterhalb etwa 5 m/s sinnvoll war - nur dann war die Aufstiegshöhe der Ballons ausreichend.

4.4 Eichung des bordgebundenen Scherwindmeßsystems

Zu Beginn der Eichung der Westerboer - Hitzdrahtsonde im Unterschall-Windkanal wurde deutlich, daß die Sonden-signale eine erhebliche Temperaturabhängigkeit zeigten. Diese war größer als bei den in der Strömungsmeßtechnik üblichen Hitzdrahtsonden. Der Grund hierfür ist einmal der starke Wärmeübergang der Westerboer - Sonde zur strömenden Luft aufgrund der relativ großen Oberfläche der spulenförmig gewickelten Hitzedrähte (s. Bild 3.3).

Zusätzlich zu dieser Abhängigkeit wird das Sondensignal auch von der Temperatur des Gehäuses selbst beeinflusst. Hierbei entsteht ein Wärmeübergang von der Kanaloberfläche innerhalb des Sondengehäuses auf die durchströmende Luft. Bei einem mittleren Scherwindgradienten von 0,05 m/s m hat die den Kanal durchströmende Luft immerhin eine Verweilzeit innerhalb des Gehäuses von etwa 1 s.

*Der Wendekreisler wurde dankenswerterweise vom Bodenseewerk Gerätetechnik GmbH in Überlingen kostenlos zur Verfügung gestellt.

Die Hitzdrähte wurden auf einem konstanten Temperaturniveau gehalten, welches oberhalb der Temperaturen der in die Sonde hineinströmenden Luft lag (diese Lufttemperatur war bei dem verwendeten Aufbau identisch mit der Umgebungstemperatur T_U). So wird fortlaufend elektrische Energie dem Sondengehäuse zugeführt. Dies führt zu einer Anhebung der Gehäusetemperatur T_S gegenüber der Umgebungstemperatur T_U . Während der Eichung zeigte sich ein erheblicher Einfluß von T_U auf das Sondensignal. Da beim Einsatz im Flugzeug ständig Temperaturänderungen auftreten, ist bei diesem Sondenverhalten keine einwandfreie Messung möglich. Auch eine Korrektur der Meßwerte bei ständiger Messung von T_S und T_U erschien uns nicht sinnvoll.

Zur Eliminierung der Temperaturabhängigkeit des Meßsystems wurde nun die Hitzdrahtsonde mit Gehäuse und der dazugehörigen Regelelektronik in einen wärmeisolierten Kasten gesetzt. Die Wärmebilanz dieses Kastens wurde so ausgelegt, daß bei den im Flug auftretenden Umgebungstemperaturen im Bereich $-10^\circ\text{C} \leq T_U \leq +30^\circ\text{C}$ die Kasteninnentemperatur auf 40°C konstant gehalten werden konnte. Ein kleines Gebläse wälzt die Luft im Kasten um und sorgt so für eine recht gleichmäßige Temperaturverteilung. Durch die konstante Innentemperatur war somit zunächst sichergestellt, daß sich T_S - nach abgeschlossenem Aufheizvorgang - nicht mehr veränderte. Um nun weiterhin auch die Temperatur der in das Sondengehäuse hineinströmenden Luft konstant zu halten, wurde ein zusätzliches Leistungsvolumen innerhalb des temperierten Kastens vorgesehen. So war sichergestellt, daß sich die Luft in der Schlauchleitung auf ihrem Wege zu den Hitzdrähten auf die Kasteninnentemperatur erwärmen kann.

Der Versuchsaufbau wurde im Unterschall-Windkanal des ILR in der Konfiguration geeicht, in der er im Flugzeug MORANE eingesetzt wurde. Die Eichung erfolgte so, daß sich nur jeweils ein Pitotrohr in der Meßstrecke des Windkanals befand und angeblasen wurde. Das zweite Pitotrohr lag dabei in ruhender Luft.

Die Druckdifferenzen Δp_L entsprachen demnach dem Staudruck des Windkanals: $\Delta p_L = 1/2 \cdot \rho \cdot V_{wk}^2$. Die Regelung der Windkanalgeschwindigkeit V_{wk} bei den sehr kleinen Geschwindigkeiten war durch eine spezielle Antriebseinheit des Kanals möglich. Die Eichkurve in Bild 4.3 enthält beide Richtungen der Durchströmung der Schlauchleitung. Die gut reproduzierbaren Hitzdrahtsignale weisen eine geringe Unsymmetrie auf, die durch Unterschiede zwischen den beiden gewickelten Hitzdrähten erklärt werden kann. Das Meßsystem ist demnach in der Lage, Scherwindgradienten oberhalb 0.02 m/s/m (entsprechend $\Delta p_L = 3 \text{ N/m}^2$) gut zu erfassen.

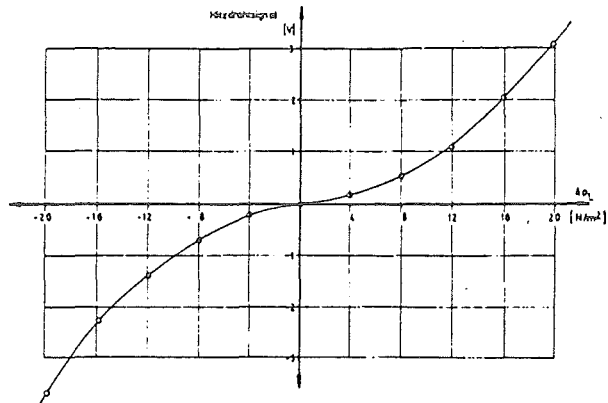


Bild 4.3 Eichkurve des bordgebundenen Scherwindmeßsystems

Sondensignal

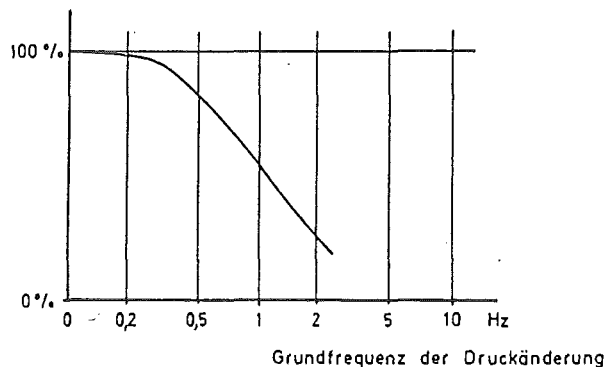


Bild 4.4 Einfluß der Frequenzen der Druckänderung auf das Sondensignal

Ein weiterer Aufbau im Windkanal diente dazu, Aussagen über den Frequenzgang des Scherwindmeßsystems zu gewinnen. Hierzu wurde vor dem in der Meßstrecke angeblasenen Pitotrohr eine sich drehende halbierte Kreisscheibe so angeordnet, daß das Pitotrohr während einer halben Umdrehung der Scheibe abgedeckt war und während der anderen halben Umdrehung dem Staudruck (20 N/m^2) ausgesetzt wurde. In Abhängigkeit von der Drehzahl der Scheibe wurden die Amplituden des Sondensignals ermittelt (s. Bild 4.4). Obgleich die Staudruckänderung in Abhängigkeit von der Zeit nicht harmonisch, sondern eher rechteckförmig erfolgte, kann doch aus Bild 4.4 eine Aussage über den Frequenzgang des gesamten Meßsystems gemacht werden. Demnach kann davon ausgegangen werden, daß das Meßsystem eine noch recht hohe Eckfrequenz von etwa 0.5 Hz besitzt.

Dieses dynamische Verhalten reicht für den Untersuchungszweck voll aus, da die zeitlichen Änderungen des Scherwindgradienten beim Durchfliegen wesentlich niederfrequenter sind (s. Abschnitt 5.2).

5. Ergebnisse der Versuchsflüge

Die im folgenden beschriebenen Ergebnisse wurden mit dem Versuchsträger MORANE-Rallye-180-Commodore erzielt. Dabei fanden die Versuchsflüge in der näheren Umgebung des Aachener Flugplatzes Merzbrück in Flughöhen unterhalb 1000 ft statt. Die gesamte Flugzeit mit der umgerüsteten MORANE betrug 13 h, wobei die Ergebnisse von 4 Versuchsstunden mit dem vierspürigen Bandgerät aufgezeichnet wurden. Dabei sind die in Abschnitt 4.2 genannten Größen ausgewählt worden. Wegen der notwendigen Beschränkung auf 4 Signale konnten die Werte von Umgebungstemperatur und Fluggeschwindigkeit V nicht registriert werden, obgleich beide Größen zur Bestimmung des Scherwindgradienten eigentlich erforderlich wären, s. Gleichung (3.5). Vom Piloten konnte nun die Fluggeschwindigkeit recht konstant auf dem Wert $v = 33 \text{ m/s}$ gehalten werden. Weiterhin waren die Wetterlagen derart, daß keine wesentlichen Temperaturänderungen in der Atmosphäre auftraten. Der Scherwindgradient konnte in dieser Weise mit guter Genauigkeit bestimmt werden.

5.1 Einfluß von Bewegungen des Flugzeuges auf das Sondensignal des Scherwindmeßsystems

Bild 5.1 zeigt einen Ausschnitt aus einem Meßschrieb. Es sind in Abhängigkeit von der Zeit folgende Größen aufgezeichnet: Höhenruderwinkel η , Vertikalgeschwindigkeit \dot{h} , Sondensignal des Scherwindmeßsystems Δp_L und Nickwinkelgeschwindigkeit $\dot{\theta}$.

Die 4 Kurvenverläufe sind nach der Tonbandaufzeichnung mit einem 1-kanaligen y-t-Schreiber nacheinander gezeichnet worden, so daß eine exakte zeitliche Synchronisation nicht mehr gegeben ist. Die Vorzeichen sind folgendermaßen definiert: positives η beim "Drücken", positives \dot{h} in Richtung Steigen, positives Δp_L bei in größeren Höhen erhöhter Anströmgeschwindigkeit. Beim Kreiselsignal $\dot{\theta}$ findet beim Richtungswechsel der Nickwinkelgeschwindigkeit eine Phasendrehung um 180° statt. Es fehlt bisher die Elektronik, diese zur Vorzeichenumkehr auszunutzen; d. h., daß das aufgezeichnete Kreiselsignal keine Informationen über die Richtung des Nickens liefert. Der Signalverlauf des Wendekreises zeigt beim Aufbau der Bewegung ein schnelles Ansprechen. Das vergleichsweise langsamere Abfallen wird durch den in der Meßkette benötigten Kondensator verursacht (s. Abschnitt 4.2).

Bei den Versuchsflügen zeigte sich erwartungsgemäß, daß eine Nickbewegung des Flugzeuges einen Einfluß auf das

Hitzdrahtsignal hat - es wird ja kurzfristig eine zusätzliche Differenz der Gesamtdrucke an den Pitotrohren induziert (s. u.). In Bild 5.1 ist eine solche Bewegung, die vom Piloten durch periodische Veränderung des Höhenruderwinkels um etwa $\pm 6^\circ$ eingeleitet wurde, zu erkennen. Durch diese 5-malige Steuerbewegung wurde eine ebenso häufige auf- und abwärts gerichtete Beschleunigung \ddot{h} bewirkt. Dies ist aus dem Kurvenverlauf der Vertikalgeschwindigkeit \dot{h} zu ersehen; das Flugzeug befand sich bei diesem Manöver im Steigflug. Die entsprechenden Maxima der Nickwinkelgeschwindigkeit liegen dabei bei $\dot{\theta} = 8^\circ/\text{s}$. Wegen des verzögerten Abbaus der Wendesignale dient der Wendekreis nur der Anzeige der Spitzenwerte (unabhängig vom Vorzeichen). Das Sondensignal des Scherwindmeßsystems weist ebenfalls eine Schwingung im Takte der Ruderbetätigung auf. Aus der Tatsache, daß es um den Wert $\Delta p_L = 0$ als Mittelwert schwingt, ist zu schließen, daß nur kleine Scherwindgradienten in dieser Flugphase vorhanden waren. Die Schwankung der Sondensignale kommt auf folgende Weise zustande:

Eine Rotation um die Querachse bewirkt am Pitotrohr 1 (s. Bild 5.2) bei positivem $\dot{\theta}$ eine Verringerung des Staudrucks:

$$q_1 = \frac{\rho_1}{2} (V - \dot{\theta} a)^2$$

Entsprechend erhöht sich der Staudruck am Pitotrohr 2:

$$q_2 = \frac{\rho_2}{2} (V + \dot{\theta} b)^2$$

Mit der vereinfachenden Annahme $\rho_1 = \rho_2$ folgt:

$$(5.1) \quad \Delta p = \Delta q = q_1 - q_2 = -\rho V \dot{\theta} (a+b) + \frac{\rho}{2} \dot{\theta}^2 (a^2 - b^2)$$

Bei dieser Rotation um die Querachse wirkt weiterhin eine Zentrifugalkraft auf die in den Schläuchen des Meßsystems befindliche Luftsäule. Da die Längen a und b ungleich sind, entsteht in der Leitung die Druckdifferenz

$$(5.2) \quad \Delta p_{ZF} = -\frac{\rho}{2} \dot{\theta}^2 (a^2 - b^2).$$

Aus der Summe der Gleichungen 3 und 4 erhält man die durch Rotation um die Querachse bewirkte Druckdifferenz

$$(5.3) \quad \Delta p_{Rot} = -\rho V \dot{\theta} (a+b) = -\rho V \dot{\theta} \Delta h$$

Die Anzeige liefert also während Drehbewegungen scheinbare Scherwindgradienten von

$$(5.4) \quad \frac{du_w}{dh} \hat{=} \dot{\theta}.$$

Bei der Translation des Flugzeuges in vertikaler Richtung treten Beschleunigungen \ddot{h} auf. Diese erzeugen aufgrund

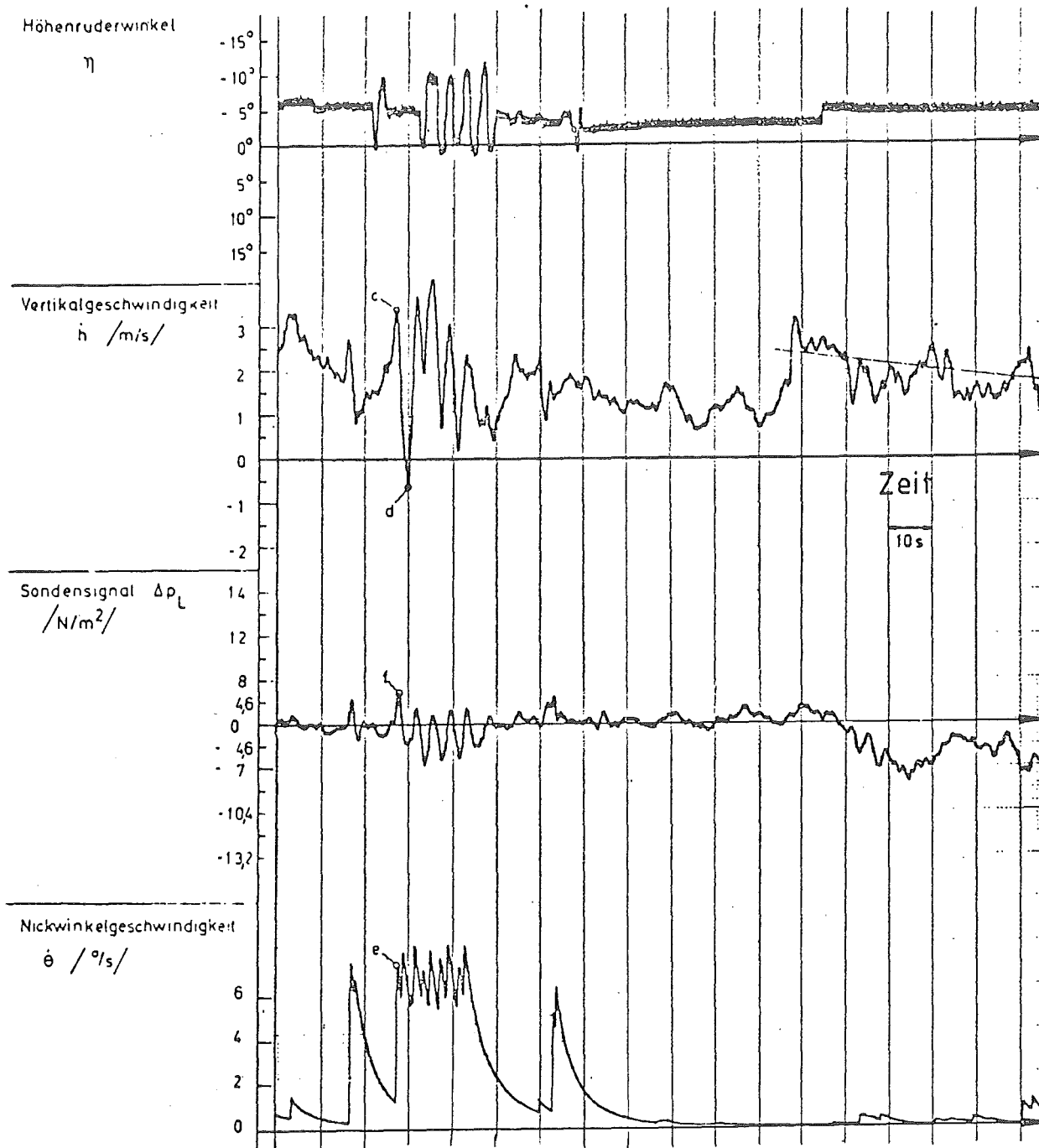


Bild 5.1 Ausschnitt eines Meßschriebes

der Massenträgheit der in den Schläuchen befindlichen Luft den Druckunterschied

$$(5.5) \quad \Delta p_{\text{Trans}} = \rho \ddot{h} \cdot (a+b).$$

Die Schrägstellung des Auslegers im Winkel ν , kann hierbei vernachlässigt werden. Aus der Addition der Gleichungen (3.5), (5.3) und (5.5) erhält man als resultierende Druckdifferenz Δp_L des Meßsystems:

$$(5.6) \quad \Delta p_L = \rho V \frac{du_W}{dh} \Delta h - \rho V \dot{\theta} \Delta h + \rho \ddot{h} \Delta h$$

Löst man Gleichung (5.6) nach $\frac{du_W}{dh}$ auf, so erhält man den Scherwindgradienten aus

$$(5.7) \quad \frac{du_W}{dh} = \frac{\Delta p_L}{\rho V \Delta h} + \dot{\theta} - \frac{\ddot{h}}{V}.$$

Für einen Ausschnitt aus Bild 5.1 soll mit Hilfe von Gleichung 5.7 der Scherwindgradient bestimmt werden: Zwischen den Punkten c und d in Bild 5.1 entsteht durch Drücken des Steuerhorns eine Beschleunigung mit dem Maximalwert $\ddot{h} \approx -2,3 \text{ m/s}^2$. Am Punkt e kann die ent-

60-10

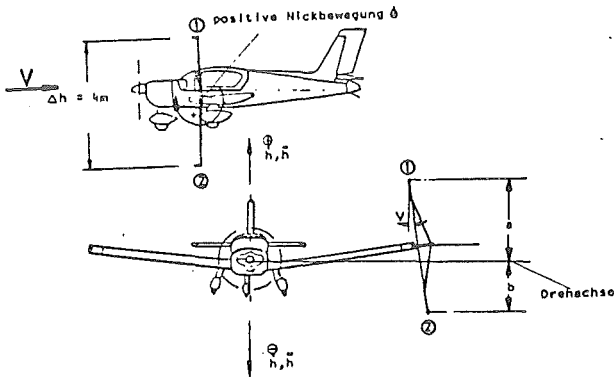


Bild 5.2 Geometrie der Anordnung des Auslegers

sprechende Nickwinkelgeschwindigkeit von $\dot{\theta} = -7^\circ/\text{s}$ abgelesen werden. Das Sondensignal weist im Punkt f den Wert $\Delta p_L = 6 \text{ N/m}^2$ auf. Mit Gleichung 5.7 erhält man den zu diesem Zeitabschnitt wirkenden Scherwindgradienten:

$$(\rho = \rho_0; V = 33,3 \text{ m/s}; \Delta h = 4 \text{ m})$$

$$\frac{du_w}{dh} = \frac{6}{1,25 \cdot 33,3 \cdot 4} - \frac{7\pi}{180} + \frac{2,3}{33,3} = -0,017 \frac{\text{m/s}}{\text{s}}$$

Die Genauigkeit der Messung des Scherwindgradienten wird durch die Überlagerung von Steuermanövern natürlich zeitweise reduziert.

5.2 Frequenzspektrum der Sondensignale des Scherwindmeßsystems

Bei der Analyse der Sondensignale muß zunächst von der Tatsache ausgegangen werden, daß auch Horizontalböen in der Atmosphäre Sondensignale des Scherwindmeßsystems in direkter Weise erzeugen. Indirekte Einflüsse zeigen auch Vertikalböen, da sie eine Wirkung auf h' und $\dot{\theta}$ haben und nach der Gleichung (5.7) Sondensignale bewirken. Dadurch besteht das grundsätzliche Problem, die Scherwindsignale von denen der Böen zu trennen.

Böen bringen dennoch keine merkliche Verfälschung der Messung des Scherwindgradienten aus folgendem Grunde: Turbulenzballen mit Durchmessern oberhalb von etwa $10 \times \Delta h$ wirken auf die beiden Pitotrohre praktisch in Phase, zeigen also keinen wesentlichen resultierenden Beitrag mehr zu Δp_L . Beim Durchfliegen kleinerer Ballen werden andererseits Störungen mit Frequenzen oberhalb

$$(5.8) \quad f > V/10\Delta h$$

auf das Meßsystem wirken. Mit $V = 33 \text{ m/s}$ und $\Delta h = 4 \text{ m}$ erhält man mit $f > 0,83 \text{ Hz}$ einen Frequenzbereich, den das Meßsystem schon merklich bedämpft und der wesentlich oberhalb der beim Durchfliegen von Scherwindfeldern zu erwartenden Frequenzen liegt. Bei einer Höhenausdehnung einer Scherschicht von nur 50 m würde nämlich

mit $V = 33 \text{ m}$ und einer Bahnneigung von $\gamma = 3^\circ$ die Dauer des Durchfliegens der Schicht einer Frequenz von nur

$$f = 0,03 \text{ Hz}$$

entsprechen, also um mehr als einer Größenordnung unter den Böen liegen. Betrachtet man nun das Sondensignal des Scherwindsystems in Bild 5.1, so sieht man, daß während der Zeit, in der keine Höhenruderwinkel-Änderungen erfolgen, kleine Schwingungen überlagert sind. Die erkennbaren Perioden liegen hierbei etwa im Bereich $1 \text{ s} \leq T \leq 5 \text{ s}$. Dies entspricht Frequenzen von $1 \text{ Hz} \geq f \geq 0,2 \text{ Hz}$. Es ist nun naheliegend, diese relativ hochfrequenten Signale auf Böen zurückzuführen. Neben diesen Schwingungen tritt in manchen Zeitbereichen eine relativ langwellige Abweichung vom Nullniveau auf - letzte 60 s in Bild 5.1 oder wiederholt in den Bildern 5.4 und 5.7. Diese durch Scherwinde bewirkten niederfrequenten Signale können durch Filterung von den höherfrequenten Signalen getrennt oder direkt durch ein träges Meßinstrument unterdrückt werden. Entsprechend der oben gemachten Frequenzabschätzung wurde hierfür ein Tiefpaßfilter mit der Grenzfrequenz 0,03 Hz verwendet. Bild 5.3 zeigt eine Gegenüberstellung des ungefilterten Sondensignals von Bild 5.1 mit dem entsprechend gefilterten.

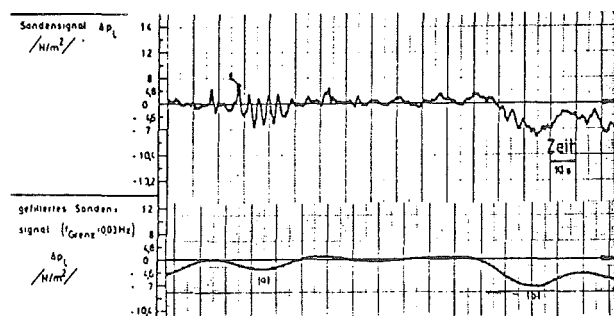


Bild 5.3 Vergleich des Sondensignals des Scherwindmeßsystems aus Bild 5.1 mit dem gefilterten

Es ist recht gut zu erkennen, daß nur die Scherwindsignale bei der Filterung übrig bleiben. Es folgt weiterhin, daß bei Filterung eine Korrektur der Sondensignale mit Gleichung (5.7) nur dann zu erfolgen hat, wenn die gesteuerten Flugzeugbewegungen unterhalb der Frequenz von 0,03 Hz liegen. Dann sind jedoch die Werte für h' und $\dot{\theta}$ so gering, daß sie meist vernachlässigt werden können. So erfolgen auch im folgenden alle Umrechnungen zwischen Sondensignal Δp_L und Scherwindgradient nach Gleichung (3.5). Bei der recht starken Filterung mit dem verwendeten analogen Filter erfolgt eine Zeitverzögerung um etwa 30 s. Diese Verzögerung wurde in Bild 5.3 und den folgenden Bildern in der Darstellung kompensiert.

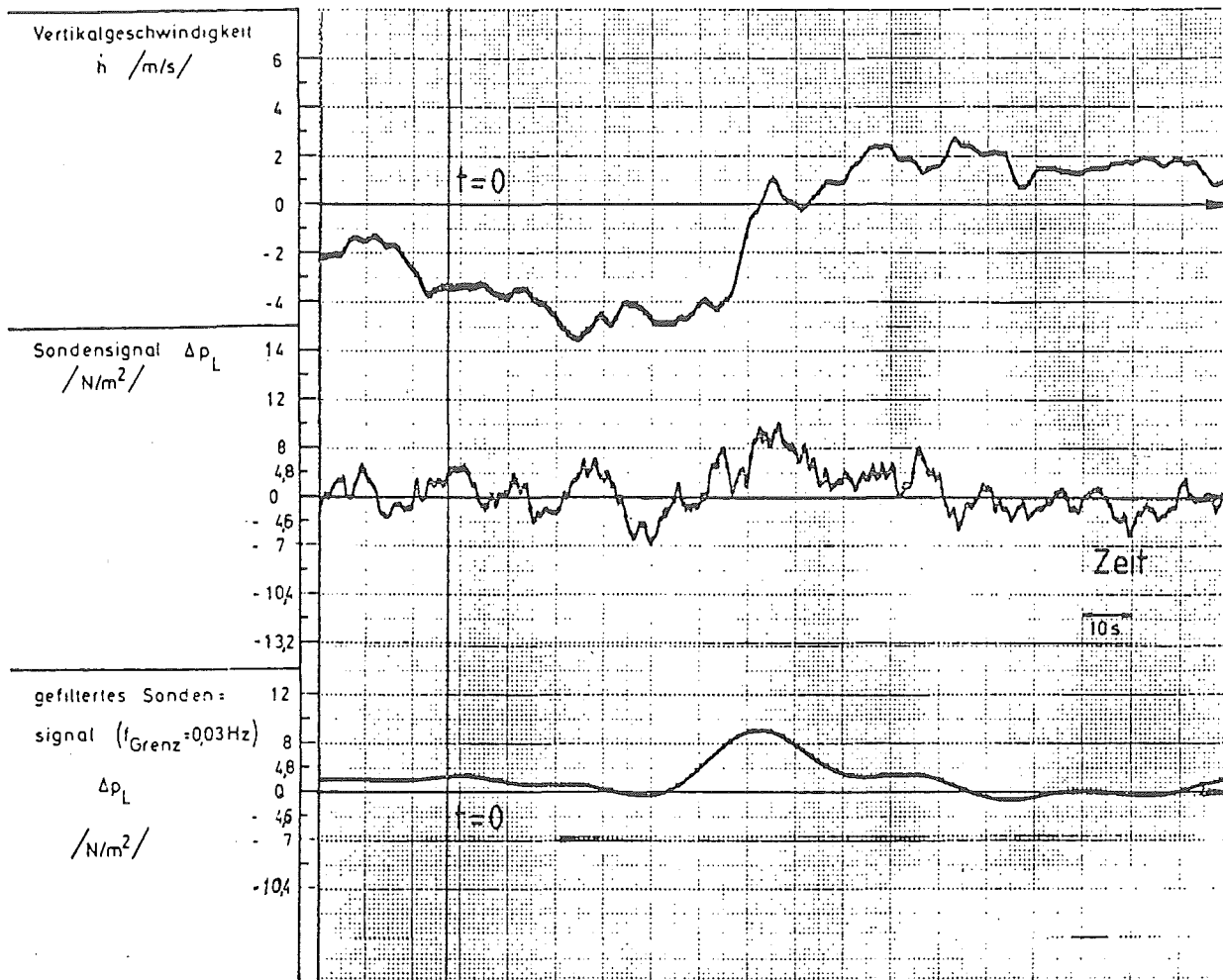


Bild 5.4 Meßschrieb für einen Anflug auf den Flugplatz, Überflug in geringer Höhe und anschließenden Steigflug

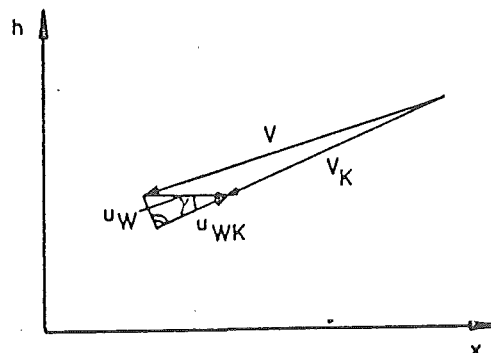
5.3 Vermessung von Windprofilen der Bodengrenzschicht mit dem Scherwindmeßsystem

Bild 5.4 zeigt als Funktion der Zeit die Vertikalgeschwindigkeit h , das ungefilterte und das gefilterte Sonden-signal Δp_L für folgenden Flugfall: Anflug auf den Flugplatz aus etwa 300 m Höhe, Überflug in etwa 10 m Höhe auf einer Strecke von ca. 600 m und anschließender Steigflug.

Unter der realistischen Annahme, daß kurzzeitig eine Höhe von 5 m erreicht wurde, kann aus den Vertikalgeschwindigkeiten folgende Flugbahn als Funktion der Zeit entwickelt werden.

Bei einer Fluggeschwindigkeit von $V = 33 \text{ m/s}$ ergibt sich für den Anflug ein Bahnneigungswinkel $\gamma = -7,5^\circ$ und beim Steigflug $\gamma = 3,5^\circ$.

Es wird von dem Scherwindmeßsystem zwar immer nur die Windkomponente u_{WK} , die in Flugbahnrichtung liegt, gemessen. Aus der Beziehung $u_{WK} = u_W \cos \gamma$ folgt jedoch bei den vorliegenden γ -Werten, daß $u_{WK} \approx u_W$ gilt.



Ermittelt man nun aus den gefilterten Sonden-signalen des Scherwindmeßsystems nach Gleichung (3.5) die Windgradienten in Abhängigkeit von der Zeit, so läßt sich unter Verwendung von Bild 5.5 das Windprofil darstellen. Dies ist in Bild 5.6 gezeichnet worden mit der Kenntnis, daß bei $h = 10 \text{ m}$ die Windgeschwindigkeit 1 m/s herrschte, und mit einer als konstant angenommenen Fluggeschwindigkeit. Der Flug erfolgte unter Gegenwind, wobei die vom Tower des Flugplatzes gemeldete Windrichtung einen Winkel von 20° zur horizontalen Flugrichtung hatte.

60-12

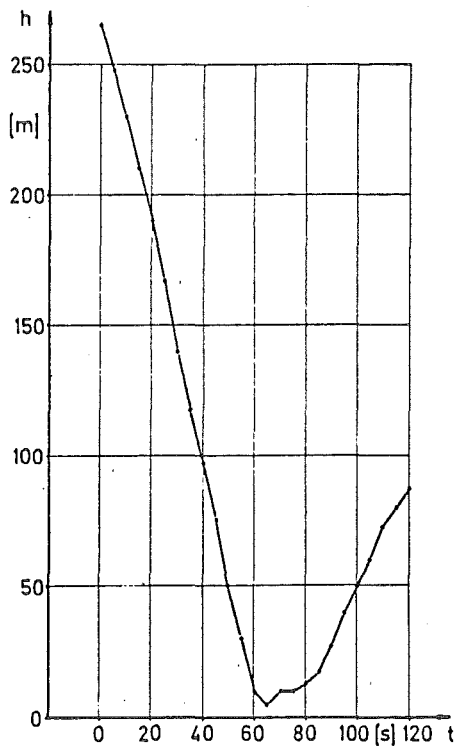


Bild 5.5 Flughöhenverlauf über der Zeit

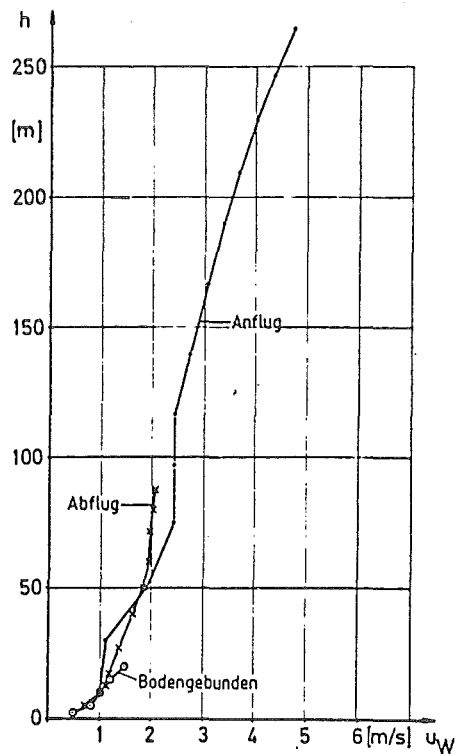


Bild 5.6 Nach Bild 5.4 ermitteltes Windgeschwindigkeitsprofil

Dem Bild 5.6 ist aus dem Vergleich des Windprofils beim An- und Abflug zu entnehmen, daß in Flugrichtung über dem gesamten Flugplatz ein etwa gleiches Windgeschwindigkeitsprofil vorlag.

Ein weiteres Beispiel zeigt der Meßschieß in Bild 5.7 für unruhiges Wetter mit recht hohen Windgeschwindigkeiten. Hier wurde der oben beschriebenen An- und Abflug wiederum durchgeführt und zwar zweimal hintereinander in

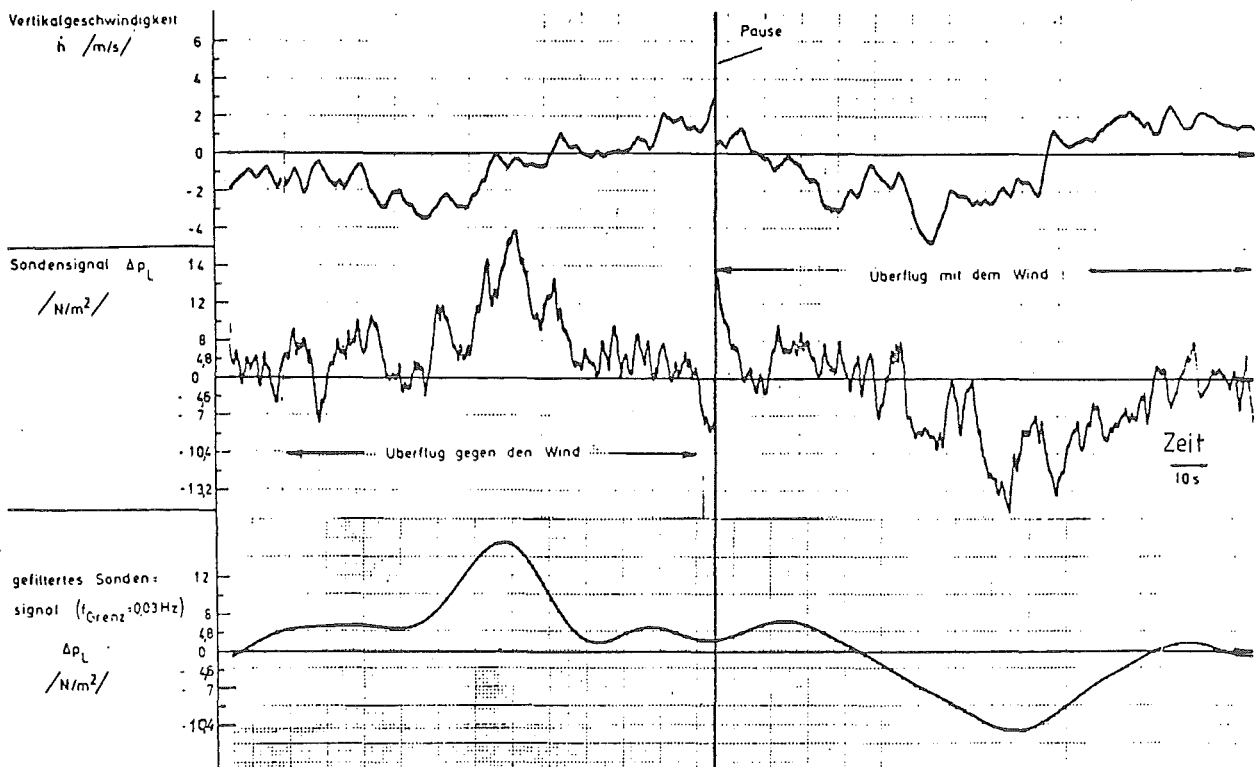


Bild 5.7 An- und Abflug an den Flugplatz zunächst gegen den Wind und anschließend mit dem Wind

entgegengesetzter Flugbahnrichtung. Zwischen den beiden Flügen wurde während des Wendemanövers eine Pause in der Aufzeichnung gemacht.

Entsprechend dem oben beschriebenen Vorgehen wurden wieder die Windprofile ermittelt. Dabei wurde in $h = 10$ m die vom Tower gemeldete Windgeschwindigkeit $u_W = 7,7$ m eingesetzt. Der erste Anflug erfolgte genau gegen den Wind, der zweite entsprechend mit Rückenwind. In Bild 5.8 sind nur die Windprofile während der Anflüge ausgewertet, da bei dem Abflug im Fall mit Rückenwind ein recht kritischer Flugfall auftrat, bei dem die Fluggeschwindigkeit nicht mehr auf dem Wert von $33,3$ m/s gehalten werden konnte.

Ein Vergleich der beiden Windprofile in Bild 5.8 zeigt, daß das Scherwindmeßsystem reproduzierbare Ergebnisse liefert. Die auftretenden Windgeschwindigkeiten sind wesentlich höher als die Werte in Bild 5.6. Die in der Bodengrenzschicht vorliegenden Scherwindgradienten haben Maximalwerte von beinahe $du_W/dh = 0,09$ m/s/m(!).

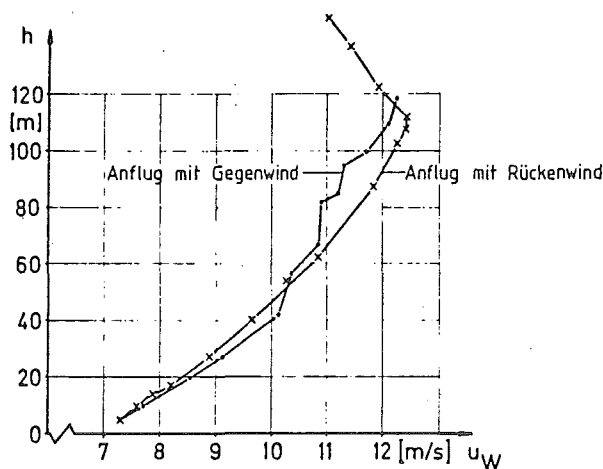


Bild 5.8 Mit dem Scherwindmeßsystem gemessenen Windprofile beim Anflug einmal mit Gegenwind und einmal mit Rückenwind.

5.4 Vergleich der Ergebnisse der bordgebundenen und der bodengebundenen Scherwindmeßeinrichtung

Mit der im Abschnitt 3.4 beschriebenen bodengebundenen Scherwindmeßeinrichtung wurden ebenfalls Windprofile über dem Flugplatz ermittelt. Das unmittelbar vor dem in Bild 5.4 dargestellten Überflug gemessene Windprofil in Bodennähe ist in Bild 5.6 zum Vergleich eingezeichnet. Aufgrund des Winkels zwischen Wind- und Bahnrichtung von 20° sind die vom bodengebundenen System gemessenen

Windgeschwindigkeiten mit $\cos 20^\circ$ multipliziert worden, um die Windkomponente u_W zu erhalten. Zumindest in Höhen unterhalb von $h = 15$ m zeigen die mit beiden Meßsystemen ermittelten Windgradienten du_W/dh recht gute Übereinstimmung. Bei diesem Vergleich ist zu berücksichtigen, daß die Messungen nicht simultan erfolgten.

9. Zusammenfassung

Ausgangspunkt für die vorliegende Arbeit war die Idee für ein einfaches, bordgebundenes Verfahren zur Messung von Scherwindgradienten. An den linken Randbogen des Flugzeugs MORANE Rallye 180 Commodore wurde ein drehbarer Ausleger mit je einem Pitotrohr an den Enden angebaut. Die beiden Pitotrohre waren während der Meßflüge in einem senkrecht zur Flugbahn gemessenen Abstand von 4 m angeordnet. Weiterhin sind sie durch eine Schlauchleitung verbunden. Liegt eine Druckdifferenz an den Pitotrohren, so wird die Schlauchleitung durchströmt. Die Strömungsgeschwindigkeit wird mit einer speziellen Hitzdrahtsonde gemessen, deren Signal ein Maß für die Staudruckdifferenz an den Pitotrohren ist. Bei den durchgeführten Meßflügen konnte mit diesem Verfahren der am Ort des Flugzeuges augenblicklich wirkende Scherwindgradient ermittelt werden. Die Flugzeit mit der umgerüsteten MORANE betrug 13 h, wobei bei normalen Wetterlagen in Flughöhen unter 1000 ft geflogen wurde. Die Ergebnisse von 4 h wurden ausgewertet. Hierbei standen neben dem Signal des Scherwindmeßsystems folgende Größen zur Verfügung:

Winkel des Höhenruders, Vertikal- und Nickwinkelgeschwindigkeit des Flugzeugs. Nach geeigneter Filterung des Signals des Scherwindmeßsystems konnten die durch Böen bewirkten Störsignale eliminiert werden.

Bei Landeanflügen, anschließendem Durchstarten und Abfliegen konnten mit den zur Verfügung stehenden Daten die Windgeschwindigkeitsprofile der Bodengrenzschicht dargestellt werden. Die hierbei gemessenen Scherwindgradienten waren gut vergleichbar mit denjenigen, die mit Hilfe eines bodengebundenen Meßaufbaus am gleichen Ort ermittelt wurden. Kurz nacheinander wiederholte Landeanflüge, abwechselnd mit Gegen- und mit Rückenwind, ergaben reproduzierbare Windgeschwindigkeitsprofile.

In der vorliegenden Arbeit konnte also ein einfaches Meßverfahren zur Bestimmung von Scherwindgradienten an Bord von Flugzeugen entwickelt und in Flugversuchen überprüft werden. Es kann für Zwecke der Flugführung aber auch zu meteorologischen Messungen verwendet werden.

Literatur

/1/ H e r z a u : Turbulenz und Windscherung im Landeanflug

Aerokurier 2/79

/2/ K r a u s p e, P.: Scherwindmessungen im Linienbetrieb

DFVLR - Mitt. 60-09

/3/ F r e d e r i k s o n, J. T.: Wind Shear, An Update

Shell Aviation News, 439/1977

/4/ C o x, W. G.: The Multi-Dimensional Nature of Wind Shear Investigations

The Society of Experimental Test Pilots.

Technical Rev. Vol 13 No. 2, 1976

/5/ W ü s t, P.: Probleme der Messung von Windgrößen mit bordüblichen Sensoren.

Z. Flugwissenschaften u. Weltraumf.

1978, Heft 6

/6/ J o p p a, R. G.: Wind Shear Determination Using Measurement of Aircraft Total Energie Change.

NASA CR - 137839, 1976

/7/ H a v e r d i n g s, H.: On the use of AIDS - data for a statistical analysis of wind shear during the approach.

DFVLR - Mitt. 80-09

Windcharakteristik und Variabilität des Wind-
vektors bis zu 200 m Höhe an der deutschen Küste
im Hinblick auf die Windkraftnutzung

G. Duensing, Deutscher Wetterdienst

Die Berechnung der Statik eines hohen Bauwerkes im Küstenbereich ist besonders problematisch, weil die Struktur des Windfeldes nicht hinreichend bekannt ist. Zur Konstruktion von hohen Brückenbauten, Hebewerkzeugen, Kohle-Veredlungs- bzw. Verflüssigungsanlagen werden Angaben über die horizontale, vertikale und auch zeitliche Variabilität des Windes bis über 200 m Höhe benötigt. Ein Windkraftgenerator ist ein sehr empfindliches Instrument, weil durch Unterschiede im Windfeld Nutations- und Präzessionsbewegungen am rotierenden System erzwungen werden. Die Statik des Bauwerkes für einen Windkraftgenerator sowie die Auslegung der Rotoren kann nur unter Verwendung geeigneter meteorologischer Parameter berechnet werden.

Es sind verschiedene Forderungen an die Meteorologen herangetragen worden, die nicht einfach zu lösen sind. Über einige Probleme, die der Deutsche Wetterdienst bearbeitet hat, ist schon berichtet worden. Abschließend soll im wesentlichen über unsere geplanten Vorhaben berichtet werden.

Neben der Statik des Bauwerkes für einen Windkraftgenerator ist die Auslegung der Rotoren zu berechnen. Während des Betriebes soll der Anstellwinkel der Flügel möglichst so verändert werden, daß ein weitgehender Gleichlauf der Generatoren erzeugt wird. Die Rotoren sollen im überkritischen Bereich

laufen, sie müssen beim Anlauf und beim Bremsen durch den kritischen Bereich gesteuert werden. Das Bauwerk reagiert auf Resonanzschwingungen des Rotors. Die dreidimensionale räumliche und zeitliche Variabilität erzeugt Kräfte in dem rotierenden System. Die unangenehmste Forderung an den Meteorologen, ist die Vorhersage unkritischer Winde für Montagen und Wartungen über einige Tage.

Der Potenzprofilansatz wurde schon 1914 von Hellmann nach empirischen Befunden entwickelt. Dieser Ansatz zur Extrapolation des Bodenwindes in größere Höhen wird in der Ingenieurtechnik häufig verwendet, um das Energieangebot des Windes für Windenergiekonverter in den Fällen abzuschätzen, in denen nur Statistiken des Bodenwindes vorliegen. Die dabei verwendeten Exponenten entstammen meist Messungen aus dem Binnenland, wo die örtlich unterschiedliche Rauigkeit des Untergrundes entscheidenden Einfluß hat.

Die Größe des Exponenten ist abhängig von der Rauigkeit des Untergrundes und von der thermischen Schichtung.

Das Gesetz hat die Form

$$\bar{V}(h_2) = \bar{V}(h) \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^a$$

$\bar{V}(h_1)$ mittlere Windgeschwindigkeit im Niveau h_1

$\bar{V}(h^2)$ mittlere Windgeschwindigkeit im Niveau h_2

h_1 Höhe Niveau 1

h_2 Höhe Niveau 2

a Exponent der Potenzformel

Als Exponent a wird der Wert 0.14 verwendet.

Die genauere Kenntnis des Exponenten im Potenzprofilansatz ist sowohl für die Technik als auch für die wirtschaftliche Rentabilität einer Anlage entscheidend. Die untere Grenzschicht (Boundary Layer) zwischen Atmosphäre und Boden ist kein einfaches Niveau, in dem in einer Höhe Wind gemessen wird. Die meteorologischen Vorgänge dieser Grundsicht sind mannigfaltig. Die unterschiedliche jahreszeitliche Vegetation bewirkt jeweils andere Rauigkeiten des Untergrundes und auch andere vertikale Temperatur- und Feuchteschichtungen, die wiederum die mikro- und mesostrukturellen Austauschprozesse bestimmen.

Die beabsichtigten Messungen mit dem Doppler-SODAR Gerät in der Küstenzone bieten den Vorteil, über alle Jahreszeiten bei einheitlichem Untergrund mit jahreszeitlich unveränderlichem Bewuchs den Exponenten für die Küstenregion genauer bestimmen zu können.

Nachdem 1915 Hellman seinen Potenzprofilansatz nach empirischen Befunden veröffentlicht hatte, führten theoretische Überlegungen zum Ansatz eines logarithmischen Windprofils für die bodennahe Grenzschicht. Auf See wurden von Brocks und Mitarbeitern (Hamburg) umfangreiche Meßserien durchgeführt, um Rauigkeitsparameter und den unterschiedlichen Einfluß der thermischen Schichtung zu bestimmen. Experimentelle Untersuchungen über die Rauigkeit an der Untergrenze der Atmosphäre und die von ihr erzeugte Turbulenz führte Lettau durch. In höheren Atmosphärenschichten wurde die Turbulenz und ihr Einfluß auf das Flugverhalten von verschiedenen Instituten bearbeitet.

Nach dem derzeitigen Stand der Wissenschaft sind die theoretischen Hintergründe teilweise geklärt. Es fehlen jedoch systematische Messungen über längere Zeitspannen, die das breite Spektrum der atmosphärischen Schichtungsverhältnisse

überdecken. Damit fehlt eine in der Technik verwendbare Parametrisierung des Windprofils und des Turbulenzzustandes der Atmosphäre. Diese notwendige Parametrisierung soll mit Hilfe von langzeitlichen Reihen durch gleichzeitige Messungen mit dem Doppler-SODAR und Messungen an Masten klassifiziert nach Luftmassen und Wetterlagen erarbeitet werden. Die Klassifikation ist notwendig, um auch spätere wetterbedingte Gefahrenmomente frühzeitig erkennen zu können. Auch eine Wettervorhersage für Windkraftwerke wird sich dieser Ergebnisse bedienen.

Die Beschreibung der vertikalen Windcharakteristik mit Hilfe des Potenzprofilansatzes kann nur für mittlere Verhältnisse glücken. Über See sind jahreszeitliche Unterscheidungen möglich, weil die thermische Schichtung durch die Temperaturdifferenz Wasser - Luft klassifiziert werden kann.

Auch die Umrechnung von Windgeschwindigkeitsdauerkurven aus dem 10 m-Niveau auf größere Höhen erfolgt über das Potenzprofilgesetz. Hierbei variiert der Exponent mit der mittleren Windgeschwindigkeit. Bei windschwachen Lagen herrscht im allgemeinen eine stabile Schichtung mit stärkerer Windzunahme nach oben als bei Sturmlagen mit neutraler Schichtung.

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen mittlere Windprofile für die Feuerschiffe FS Borkumriff und FS TW Ems.

Zur wirtschaftlich optimalen Konstruktion werden auch Extremwerte der Windgeschwindigkeit und ihrer Variabilität benötigt. Es wurde zu diesem Problem schon berichtet. Die Windcharakteristik an einem Ort ist aber stark von der Umgebung abhängig. Wald bewirkt eine Bremsung des Windes, die mittlere Windgeschwindigkeit wird niedriger. Rauigkeit erhöht aber auch die Turbulenz im Windfeld.

Die Wetterstation List auf Sylt hat durch ihre exponierte Lage hohe Windspitzen und Schwankungen, so daß unter Hinzu-

ziehung dortiger langjähriger Meßserien extreme Betriebsbedingungen bestimmt werden können.

Der Einfluß der orographischen Lage einer Station soll am Beispiel List dokumentiert werden. Als Böenfaktor b definieren wir das Verhältnis Momentanwind (Δt ca. 5 s) zu Mittelwind ($\Delta t = 10$ min). Dieser Wert beträgt an der Küste bei Stationen in Normallage $b = 1.3$. An der Wetterstation List $b = 1.7$, weil diese Station auf einer Düne liegt. Die Werte der Kurve für die Böen müssen reduziert werden, sofern sie allgemeine Gültigkeit erlangen sollen.

Abbildung 3 zeigt die mittleren jährlichen Überschreitungshäufigkeiten der Windgeschwindigkeit, links ist das 10-Minuten-Mittel, rechts der höchste Momentanwind im gleichen Zeitintervall für die Wetterstation List (Sylt) abzulesen. In der Mitte ist die über den Böenfaktor $b = 1.3$ berechnete Kurve für das Eintreten höchster Momentanwerte, die für das Umfeld reduziert sind.

Die Verknüpfung zwischen Böengeschwindigkeit, 10-Minuten-Mittel und 1-Stunden-Mittel ist örtlich verschieden. Wie auch der Böenfaktor: Er beträgt zur Abschätzung von Böen aus 10 Minuten Mittel:

an der Küste	normale Lage	1.3	Kuppen	1.7
Binnenland		1.8		1.4 .

Der Böenfaktor nimmt in Deutschland von Nordwest nach Südost zu.

In der Bautechnik wird eine Beziehung zwischen Momentangeschwindigkeit des Windes und den Mittelwerten über 1 Minute, 10 Minuten oder 1 Stunde verwendet, die einen Zuschlag auf den Mittelwind gibt.

$$V_g = V_m \left(1 + g \frac{\sigma_g}{V_m} \right)$$

V_g Momentaner Wind

V_m Mittlerer Wind

σ_g Streuung, mittlerer Fehler

$g = 3.5$ (üblich verwendet in Bautechnik, bei Verwendung von Stundenmitteln)

Die Abbildung 4 zeigt gemessene Vergrößerungsfaktoren der dem Mittelungsintervall ΔT zugeordneten Windgeschwindigkeiten bezogen auf die Stundenmittel der Windgeschwindigkeiten. Diese Werte liegen im offenen Gelände am niedrigsten, in der Bebauung am höchsten.

Die Abbildung 5 stellt als Tabelle die arithmetischen Mittelwerte und Medianwerte für den Windweg, Zeitraum 1971 bis 1976 auf deutschen Feuerschiffen zusammen. Die arithmetischen Mittel liegen gering über den Medianwerten.

Während Gewitter ihre größten Windstärken in der Böenwalze aufweisen, die das Gewitter einleitet, baut sich das Windfeld der Orkantiefs langsamer auf. Das Windmaximum wurde in 12 Stürmen die aus der Zeit 1962 bis 1977 auftraten, frühestens 3 Stunden nach der ersten Böe $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ erreicht, in der Mehrzahl der Fälle trat es erst 10 Stunden nach Sturmbeginn auf.

Die Abbildung 6 zeigt die Sturmandauer und Häufigkeit von Böenstunden $V \geq 17 \text{ m s}^{-1}$ für Hamburg Seewetteramt aus 1962 bis 1977. In der ersten Spalte steht das Datum mit Andauer und maximaler Böe für jeden Sturm. In der folgenden Spalte sind die Stunden zu entnehmen, die bis zum Eintritt der maximalen Böe (nachdem in einer Stunde eine Böe den Wert $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ erreicht oder überschritten hatte) vergehen. Ferner enthält die

Tabelle die Anzahl der Stunden mit Böen über 17, 25, 29, 33 m s^{-1} , sowie die Anzahl der Böen über 29 bzw. 33 m s^{-1} .

Die Abbildung 7 stellt die Beziehungen zwischen Spitzenböen $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ und dem Zehnminutenmittel der Windgeschwindigkeit dar. Die Böen überschreiten das Zehnminutenmittel besonders stark, wenn der Wind aus dem Nordwestsektor weht.

Für den Südwestsektor beträgt der Korrelationsfaktor zwischen Spitzenböe und Zehnminutenmittel 0.92, die Regression 1.24. Es ergibt sich die mittlere Böenstärke von 22.6 m s^{-1} . Bei der stärksten Böe von 36 m s^{-1} betrug das Zehnminutenmittel 23.8 m s^{-1} . Beim höchsten Zehnminutenmittel von 26.0 m s^{-1} erreichte die Spitzenböe 31 m s^{-1} .

Für den Nordwestsektor ergab sich ein Korrelationsfaktor von 0.87 und eine Regression von 1.48. Das Gruppenmittel der Spitzenböen erreichte 24.7 m s^{-1} bei einem Zehnminutenmittel von 14.0 m s^{-1} . Die stärkste Böe von 39 m s^{-1} hatte ein Zehnminutenmittel von 19.0 m s^{-1} aufzuweisen; beim höchsten Zehnminutenmittel von 21.4 m s^{-1} erreichte die Spitzenböe 37 m s^{-1} .

Für die Schadenswirkungen der Böen dürfte neben ihrer Spitzengeschwindigkeit der Anstieg der Windgeschwindigkeit bei Einsetzen der Böe von Bedeutung sein. Ein weiterer Faktor wäre die Periodizität der Böenfolgen, die zu Schwingungen Anlaß geben kann. Beides kann aus den üblichen Registrierungen des Windes nicht ermittelt werden. Hierfür dient unsere Meßanlage in Sylt.

Um ein Vergleichsmaß für die Windgeschwindigkeitsänderungen vor Spitzenböen zu bekommen, wurde das Minimum der Windgeschwindigkeit innerhalb der 10 Minuten vor der Böe der Registrierung entnommen. Diese Differenz der Spitzenböe gegen dieses Minimum ist ein Maß für die Schwankungsbreite der Windgeschwindigkeit in den 10 Minuten bis zur Spitzenböe. Diese

Größe ist in Abbildung 8 in Abhängigkeit zur Böenstärke dargestellt. Bei Stürmen aus dem Nordwestsektor ist die Zunahme größer als bei solchen aus dem Südwestsektor.

Für die Nachführung der Rotoren im Windfeld ist es besonders wichtig, die spontanen Richtungsänderungen des Windes bei verschiedenen Geschwindigkeiten zu kennen. Diese Untersuchungen sollen von uns noch durchgeführt werden. Für größere Höhen wollen wir auch hierfür das Doppler-SODAR einsetzen.

Aus unseren vorliegenden Beobachtungen haben wir Winddrehungen innerhalb einer Betriebsphase ermittelt. Als Betriebsphase definieren wir die Zeit, in der die Windgeschwindigkeit ununterbrochen mindestens 5 m s^{-1} beträgt.

Für die Deutsche Bucht ergeben sich folgende maximale Winddrehungen an den Feuerschiffen:

	Betriebszeit	Maximale Winddrehung	Umdrehung
Borkumriff	6 d	290°	0.8
Weser	4.5 d	540°	1.5
Elbe 1	22.8 d	670°	1.9
Fehmarn Belt	18 d	480°	1.3
Deutsche Bucht	1.1 d	270°	0.7

Wenn nicht nach einer Betriebsphase der Rotor zurückgedreht wird, ergibt sich eine maximale Drehung von 1400° .

An einem einzelnen Beispiel soll die Passage einer Gewitterfront gezeigt werden. Mit R ist die Windrichtung, mit U die Windgeschwindigkeit bezeichnet.

Der Wind dreht aus östlichen Richtungen mit 5 m s^{-1} nach kurzzeitigem Abflauen innerhalb von 10 s auf westliche Richtungen mit 15 m s^{-1} . Dabei setzt das Auffrischen typischerweise in den unteren Niveaus zuerst ein.

Es fehlen heute noch immer lange Serien von Aufzeichnungen meteorologischer Parameter in kurzen Zeitabständen. Der Deutsche Wetterdienst wird, sofern das BMFT das Projekt weiterhin stützt, zunächst an der Wetterstation List in einem Zeittakt von 10 Hz an zwei festinstallierten Masten, sowie zwei mobilen Masten das Temperatur-, Feuchte- und Windfeld bis zu 30 m Höhe mit üblichen Sensoren messen und zusätzlich im Takt von 2 s den Wind mit Doppler-SODAR bis zu 15 Höhenstufen von je 20 m Höhe bestimmen.

Die Daten sollen über PCM auf Magnetband aufgezeichnet werden. Für die Konvertierung wird eine Konvertierstation erforderlich. Die konvertierten Daten werden anschließend auf der neuen Rechananlage Control Data Cyber 170-720 im Seewetteramt bearbeitet.

Die Meßdaten sollen nach folgenden statistischen Verfahren wissenschaftlich untersucht werden:

- Bildung von mittleren Windprofilen über 10 und 60 Minuten
- Varianzanalyse des Windvektors für jeweils 60 Minuten
- Bestimmung der Richtungsvariabilität in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit
- Bestimmung des Böenfaktors
- Ermittlung des Exponenten des Potenzprofilansatzes für verschiedene Mittelungszeiträume
- Berechnung der Spektralverteilung der Windenergie für jeweils 60 Minuten
- Bestimmung von Extremwerten

Dabei soll besonderes Gewicht auf die Analyse der betriebsgefährdenden Scherwindsituationen gelegt werden und eine in der Technik verwendbare Parametrisierung mit Hilfe von Luftmassen- und Wetterlagenklassifikationen für die Exponenten des Potenzprofiles, die Variabilität und Charakteristik des Windfeldes entwickelt werden.

Speziell soll die funktionale Abhängigkeit von verschiedenen Parametern ermittelt werden:

- Berücksichtigung von Zeitparametern
(Jahreszeit, Tageszeit, Mittelungszeiträume u.a.)
- Abhängigkeit von der Höhe über Grund
- Abhängigkeit von der Stabilität der Luftschichtung in Bodennähe
- Abhängigkeit von der mittleren Energie des Windes in dem betreffenden Zeitraum
- Trennung nach verschiedenen Wetterlagen

Die Abbildung 9 zeigt das Auftreten von Stürmen in den letzten Jahrzehnten.

Aus diesen Daten Perioden herleiten zu wollen, wäre falsch. Es handelt sich nur um Scheinperioden mit wechselnd starken Winden, die zufallsbedingt sein können, nur eine gewisse Zeit andauern und dann verschwinden. Die Scheinperioden gehören zu langen Schwingungen im Spektrum eines stationären Zufallsprozesses.

Autokorrelations- und Spektralanalysen der Häufigkeit von Nordwest- und Südwestlagen in Norddeutschland zeigen Energiespitzen im Spektrum, die im Zufallsbereich liegen. Ein Trend ist nicht feststellbar. Deshalb ist eine Zunahme der Sturm bringenden Nordwestlagen für Nordwestdeutschland nicht beweisbar.

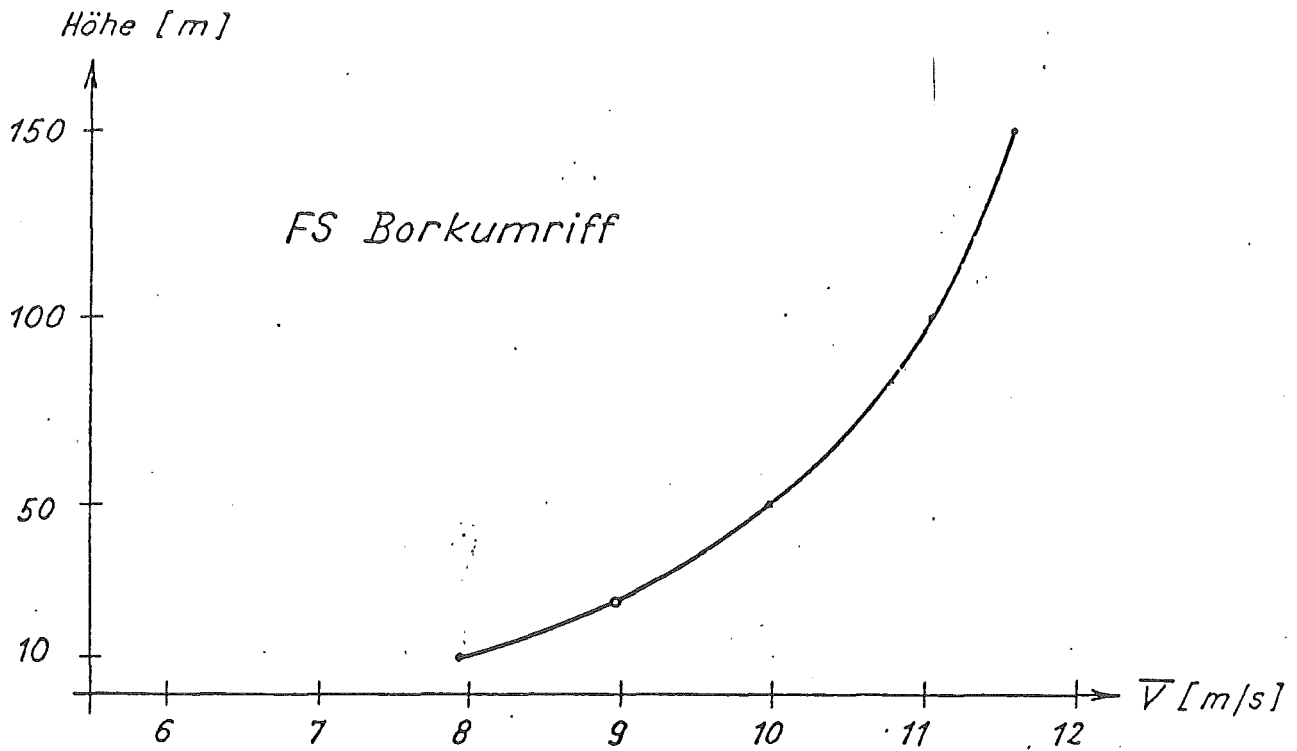


Abb. 1

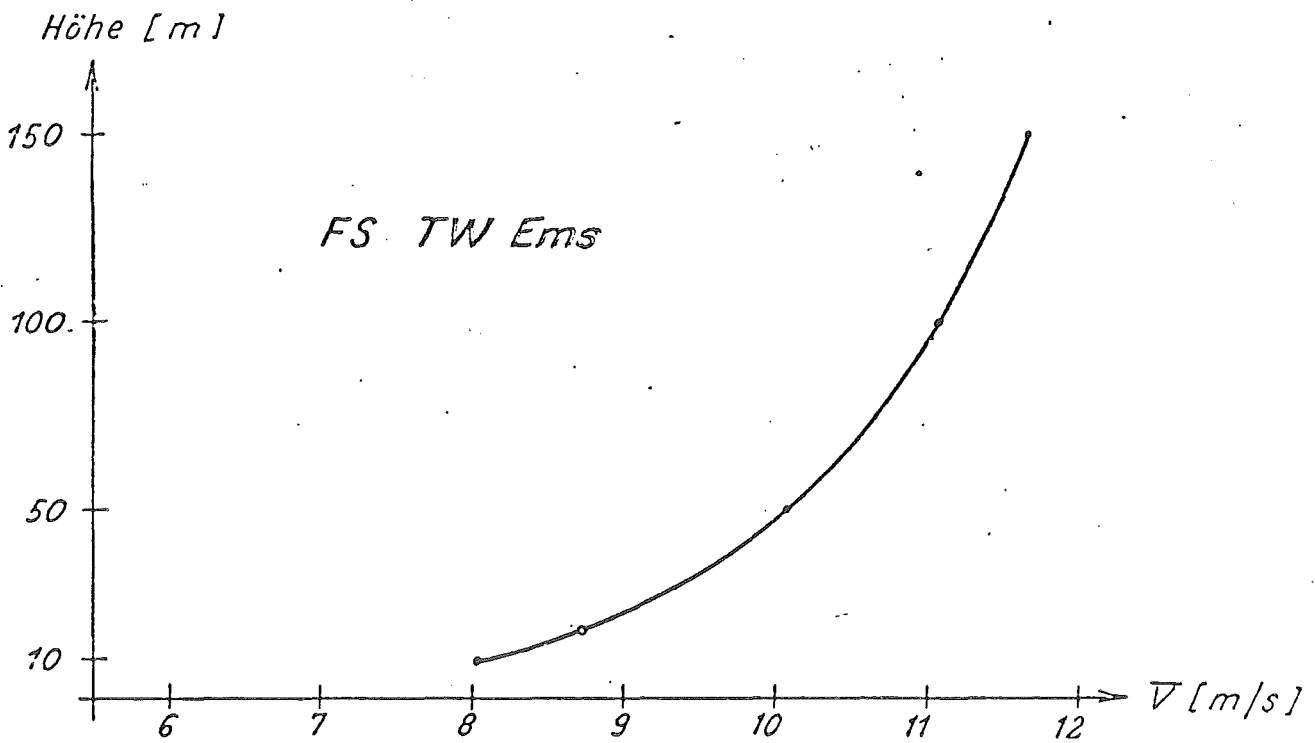
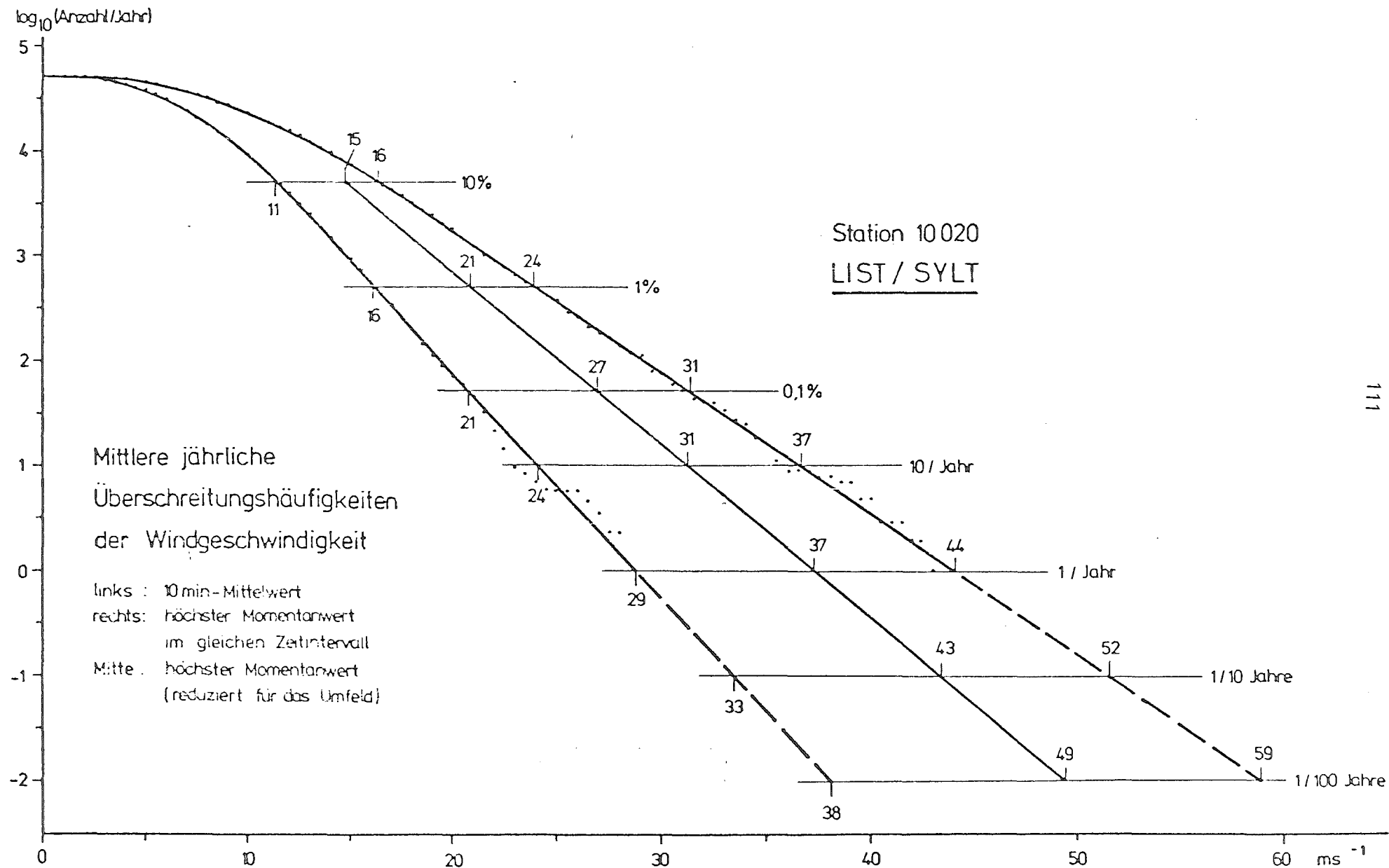
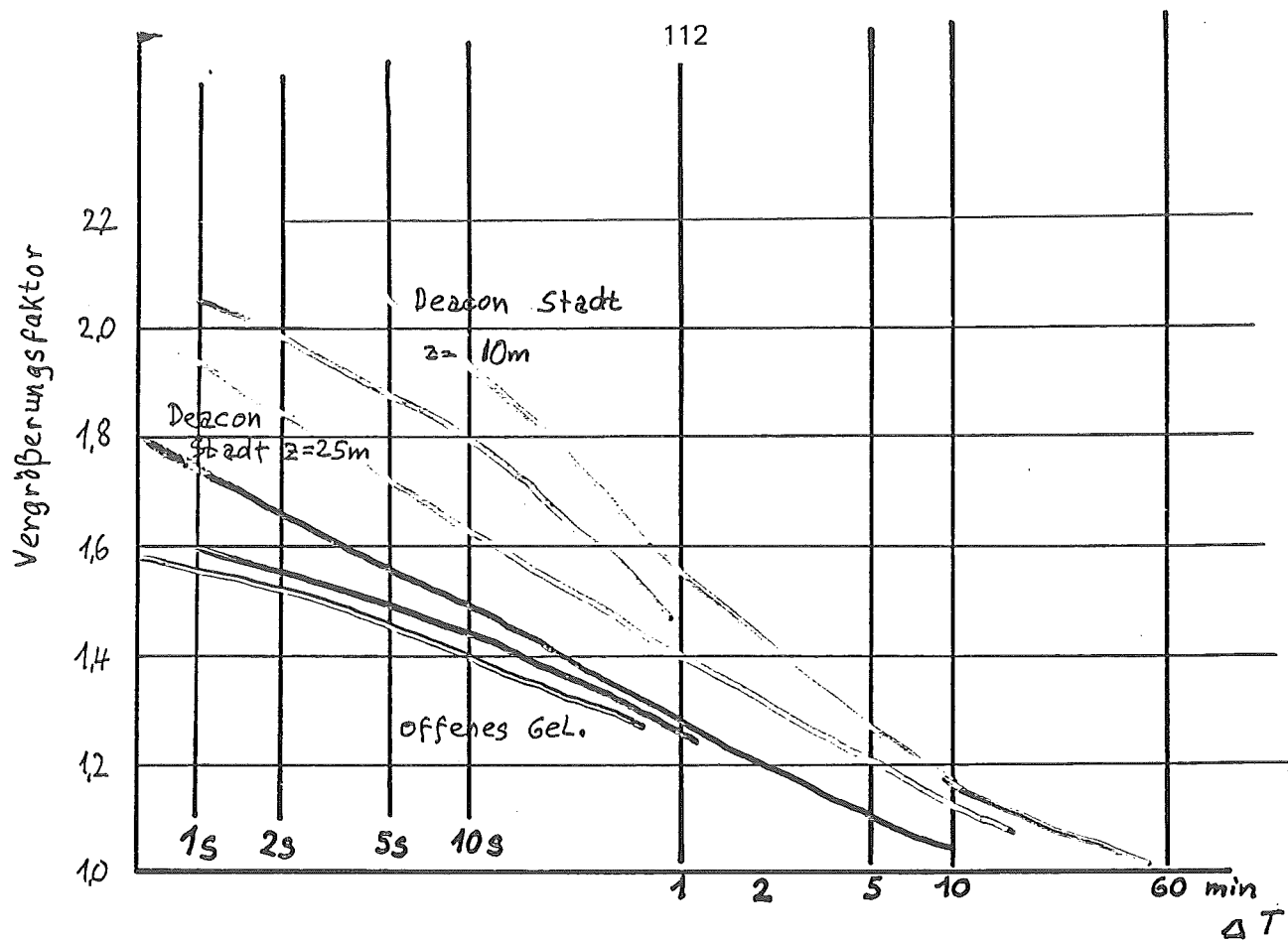


Abb. 2 Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe

Abb. 3 Mittlere jährliche Überschreitungshäufigkeit List(Sy1t)





Vergrößerungsfaktoren der dem Mittelungsintervall ΔT
zugeordneten Windgeschwindigkeiten
bezogen auf die Stundenmittel der Windgeschwindigkeiten

Abb. 4

Tabelle: Arithm. Mittelwert und Median für den Windweg,
Zeitraum 1971 bis 1976 auf Deutschen Feuerschiffen

Station	Arith.Mittelwert (AM)	Median (M)	Delta (AM-M)
	m/s.	m/s	m/s.
FS Borkum	8,69	7,79	+ 0,90
FS TW Ems	8,51	7,62	+ 0,89
FS Deut. Bucht	8,49	7,63	+ 0,86
FS Elbe 1	8,09	7,24	+ 0,85
FS Elbe 2	7,80	6,99	+ 0,81
FS Weser	8,19	7,34	+ 0,85
FS Fehmarn	7,89	6,97	+ 0,92

Anmerkung:

Die Werte für den Median wurden aus der Häufigkeitsverteilung der einzelnen Stationen gewonnen.

Bei den Werten handelt es sich um Rohwerte, ohne Rücksicht auf die Höhe des Sensors.

Abb. 5

Abb. 6 : Auswertung von Stürmen Hamburg-St.Pauli (nach Reidat)

Tabelle

Sturmandauer und Häufigkeit von Böenstunden ≥ 17 m/sec
Hamburg St. Pauli 1962 — 1977.

Datum Sturmandauer Max. Böe m/sec.	Std. d. Wind- Max.	Anzahl d. Böenstunden				Böenanzahl	
		17	25	≥ 29	33	≥ 29	≥ 33
1962							
11.2.10 — 12.2.23							
36 Std., 36 m/sec.	16	26	14	4	1	12	3
15.2.22 — 16.2.01							
51 Std., 39 m/sec.	14	49	28	16	3	44	6
1963							
18.11.06 — 19.11.07							
25 Std., 28 m/sec.	25	21	3	—	—	—	—
1965							
9.5.09 — 19							
10 Std., 35 m/sec.	4	9	2	1	1	4	1
1.11.08 — 2.11.15							
31 Std., 31 m/sec.	6	31	11	2	—	2	—
1967							
23.2.11 — 24.2.16							
29 Std., 34 m/sec.	11	29	16	6	1	34	1
17.10.07 — 18.10.09							
26 Std., 33 m/sec.	11	20	11	4	1	20	1
1968							
15.1.04 — 16.1.05							
25 Std., 31 m/sec.	12	25	10	6	—	11	—
16.3.22 — 19.3.00							
51 Std., 26 m/sec.	18	50	2	—	—	—	—
1972							
13.11.04 — 18							
14 Std., 32 m/sec.	8	10	3	1	—	4	—
1976							
3.1.03 — 23							
20 Std., 37 m/sec.	3	20	16	12	—	51	2
1977							
24.12.02 — 25.12.02							
24 Std., 36 m/sec.	9	22	8	4	3	18	4

Tabelle

Häufigkeit von Einzelböen ≥ 29 und ≥ 33 m/sec in 1 Stunde und ihr prozentualer Anteil an der Gesamtzahl der Böen

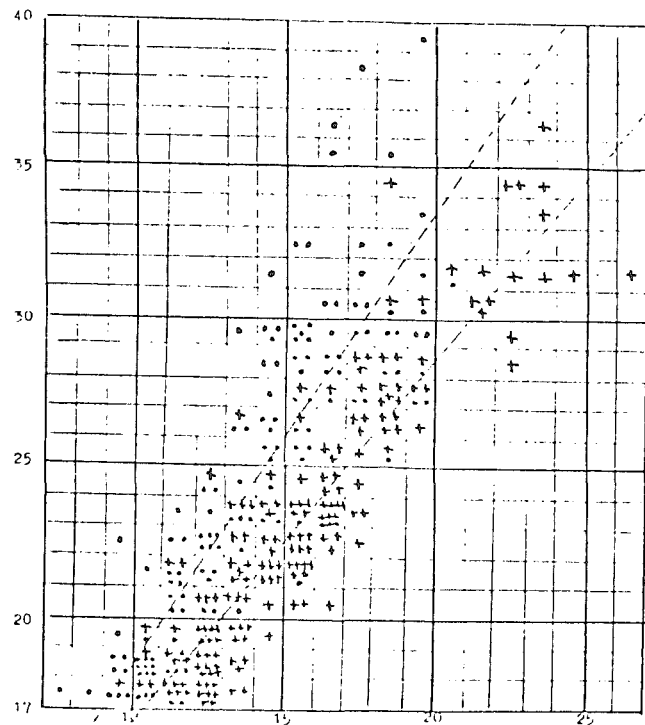
	Anzahl der Spitzenböen in 1 Stunde					
	1	2	3—4	5—9	≥ 10	Max.
Anzahl ≥ 29	16	10	15	11	3	16
%	8	10	27	35	20	
Anzahl ≥ 33	8	2	2			3
%	45	22	33			

Tabelle

Anzahl und prozentuale Häufigkeit der Stunden mit Spitzenböen ≥ 17 m/sec, des zugehörigen Zehnminutenmittels und des Stundenmittels der Windgeschwindigkeit.

Beaufort	4	5	6	7	8	9	10	11	12
m/sec.	≤ 7	8—10	11—13	14—16	17—20	21—24	25—28	29—32	≥ 33
Spitzenböen					101	89	68	43	13
Anzahl %					32	28	22	14	4
10 min.-Mittel		25	108	106	59	15	1		
Anzahl %		8	34	34	19	5	0		
Std.-Mittel	3	60	114	79	49	9			
Anzahl %	1	19	36	25	16	3			

Abb. 8



Beziehungen zwischen Spitzenböen ≥ 17 m/sec und dem Zehnminutenmittel der Windgeschwindigkeit.

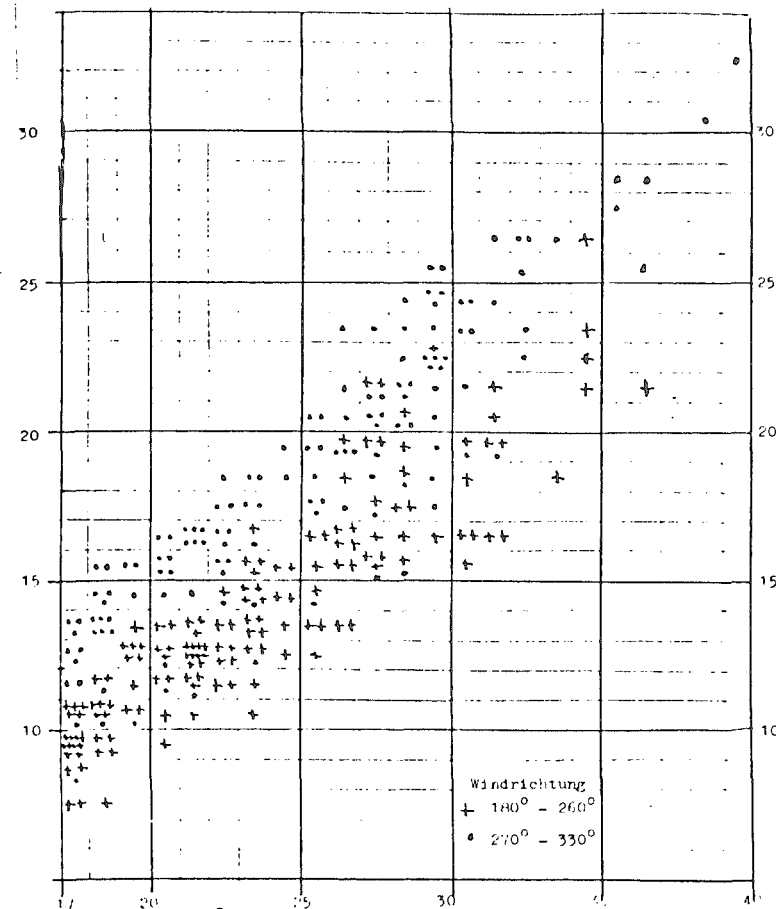
Windrichtung:

Kreuze = 180° bis 260° (Regression ausgezogen)

Punkte = 270° bis 330° (Regression strichliert)

In Abbildung 1 sind in einem Koordinatensystem Zehnminutenmittel und Spitzenböen die Einzelwerte der Spitzenböen sowie auch die Regressionen getrennt nach den Gruppen Windrichtung $\leq 260^\circ$ und $\geq 270^\circ$ eingetragen. Orkanböen (> 29 m/sec) treten bei Winden aus der Elbniederung ($\leq 260^\circ$) mit Zehnminutenmitteln zwischen 18 und 26 m/sec auf. Die über die Stadt ($\geq 270^\circ$) einfallenden Winde weisen Orkanböen bei Zehnminutenmitteln zwischen 13 und 21 m/sec auf.

Abb. 7



Zunahme der Windgeschwindigkeit im Bereich bis zu 10 Minuten vor Spitzenböen ≥ 17 m/sec.

Windrichtung:

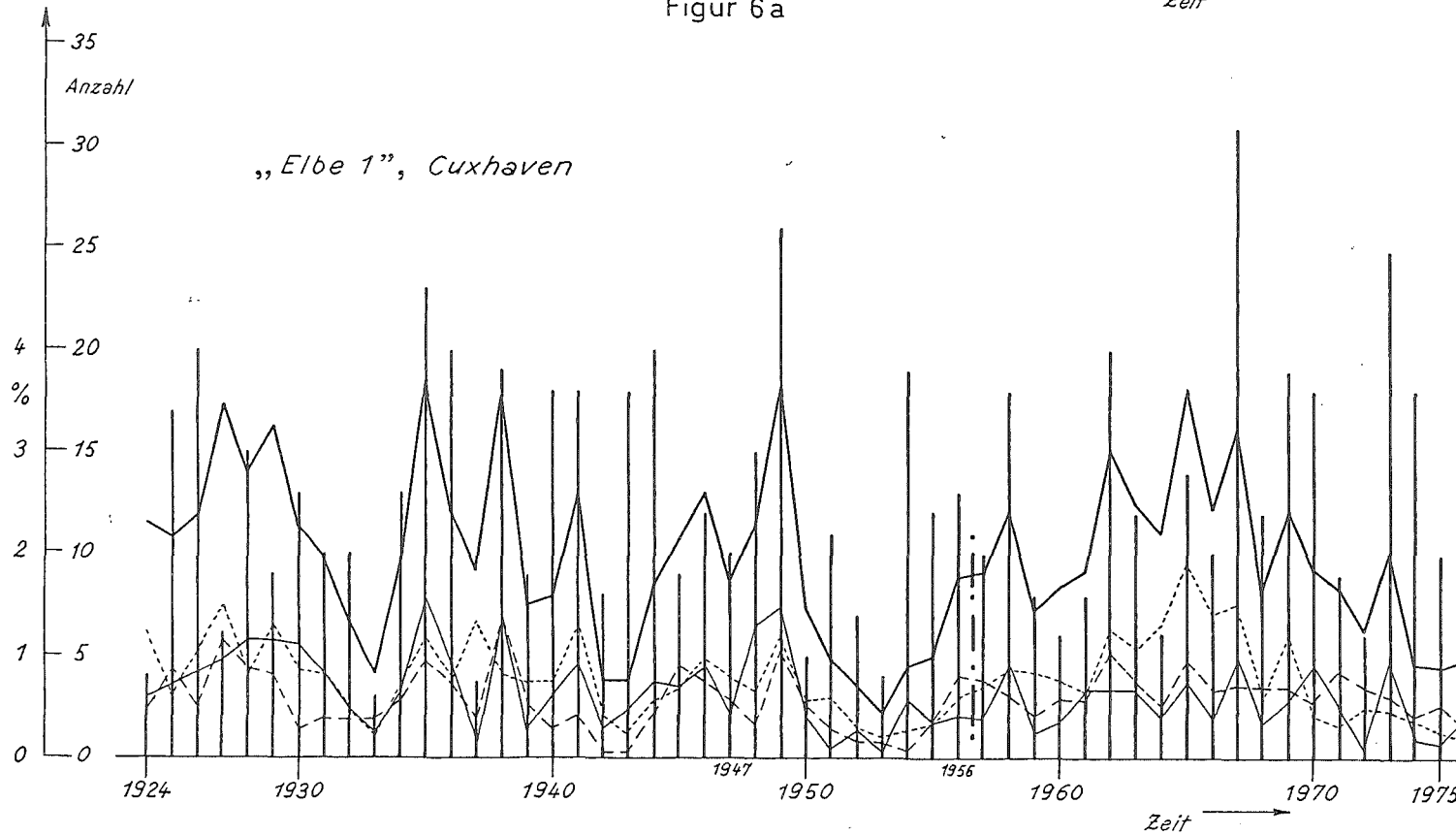
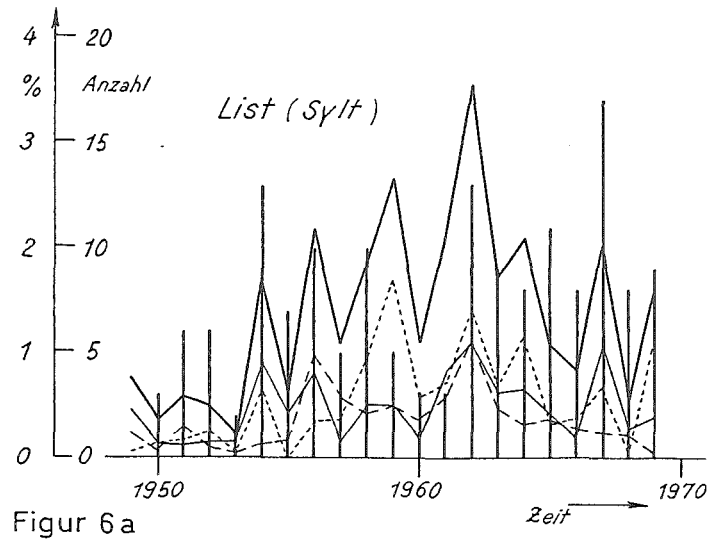
Kreuze = 180° bis 260° ,

Punkte = 270° bis 330° .

Sturmhäufigkeiten

- Stürme alle Richtungen
 — " aus NW 280° - 340°
 - - - " " SW 210° - 250°
 ····· " " übrigen Richtungen

Säulen: Anzahl der Sturmfluten
≥ 1m über MHW



Simultane Windgeschwindigkeitsmessungen hoher
Zeitauflösung in verschiedenen großen Höhen für die
Auslegung von Windenergiekonvertern

W. Beckröge; K. Berberich, G. Obermair
ATW GmbH; Universität Regensburg

Das Forschungsprojekt ET 4348 A/B "Simultane Windgeschwindigkeitsmessungen des vertikalen und horizontalen Windfeldes zur Ermittlung der kritischen turbulenzbedingten Auslegungsdaten großer Windkraftanlagen sowie der Abschätzung der Energieausbeute" wird durchgeführt von der ATW-GmbH Regensburg (federführend) in Zusammenarbeit mit der Universität Regensburg. Über Ausgangspunkt und Zielsetzung dieses Meßprogrammes wurde im ersten Vortrag dieses Symposiums von Herrn Obermair [1] berichtet, hier sollen die Messungen selbst dargestellt werden.

Es wird an zwei Standorten gemessen: in Aurich/Ostfriesland, 24 km von der Küste entfernt und auf dem Keilberg bei Regensburg, einer Kuppenlage im Binnenland. Träger der Meßeinrichtungen sind Rundfunksendemasten des Norddeutschen, bzw. Bayerischen Rundfunks. Beide Masten sind zylindrische Stahlrohre mit einem Durchmesser von 1.5 m. In den Höhen, in denen an den Masten Plattformen angebracht sind, konnten die Ausleger mit den Meßgeräten montiert werden. Daß diese Höhen gut in den für große Windkraftanlagen relevanten Dimensionen (Nabenhöhe, Rotorkreisdurchmesser) liegen, zeigt Fig.1.

vorgetragen von K. Berberich.

Die Verfasser danken Herrn Dr. H. Schroers und Herrn Dr. L. Jaraß für ihre wertvolle Mitarbeit an diesem Projekt.

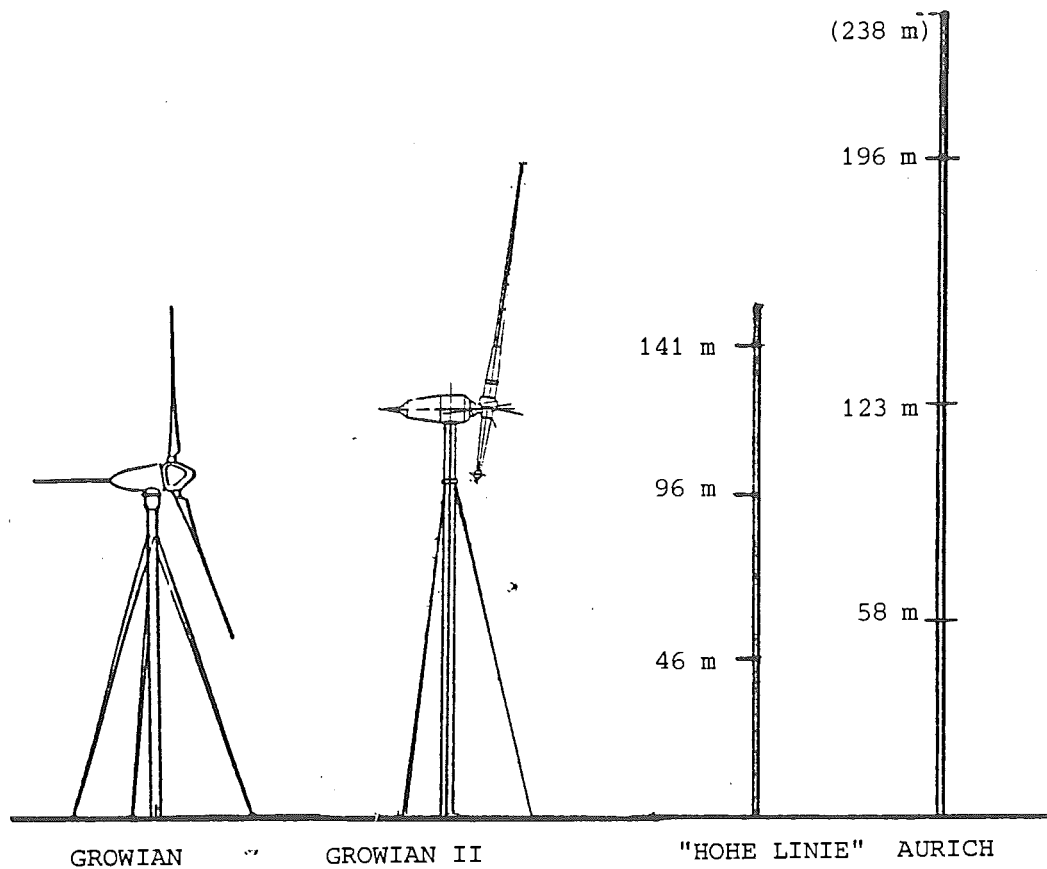


Fig. 1: Höhenvergleich der Windmeßmasten mit den projektier-
ten Windkraftanlagen GROWIAN und GROWIAN II.

Am Sendemast Aurich sind pro Meßhöhe 3 Ausleger an-
gebracht, jeweils 4 m lang und um 120° versetzt.
Dadurch kann der Masteinfluß weitgehend eliminiert
und die Meßsicherheit wesentlich erhöht werden.
Zur Wartung der Meßgeräte können die Ausleger an
die Plattform herangeklappt werden.

Jeder Ausleger trägt an der Spitze ein Schalenstern-
anemometer, der Ausleger in Richtung 304° zusätz-
lich eine Windfahne.

Fig.2 zeigt als Überblick den Aufbau der Meßanlage
Aurich:

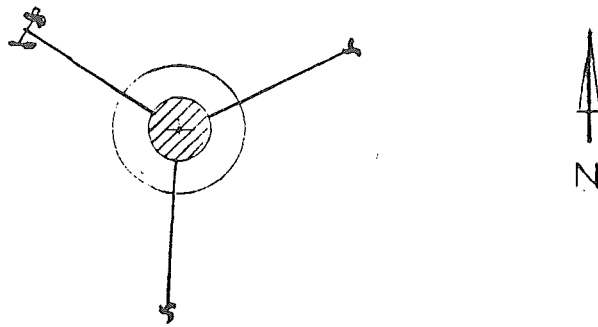


Fig. 2 a): Aufsicht auf Mast mit Plattform und Ausleger

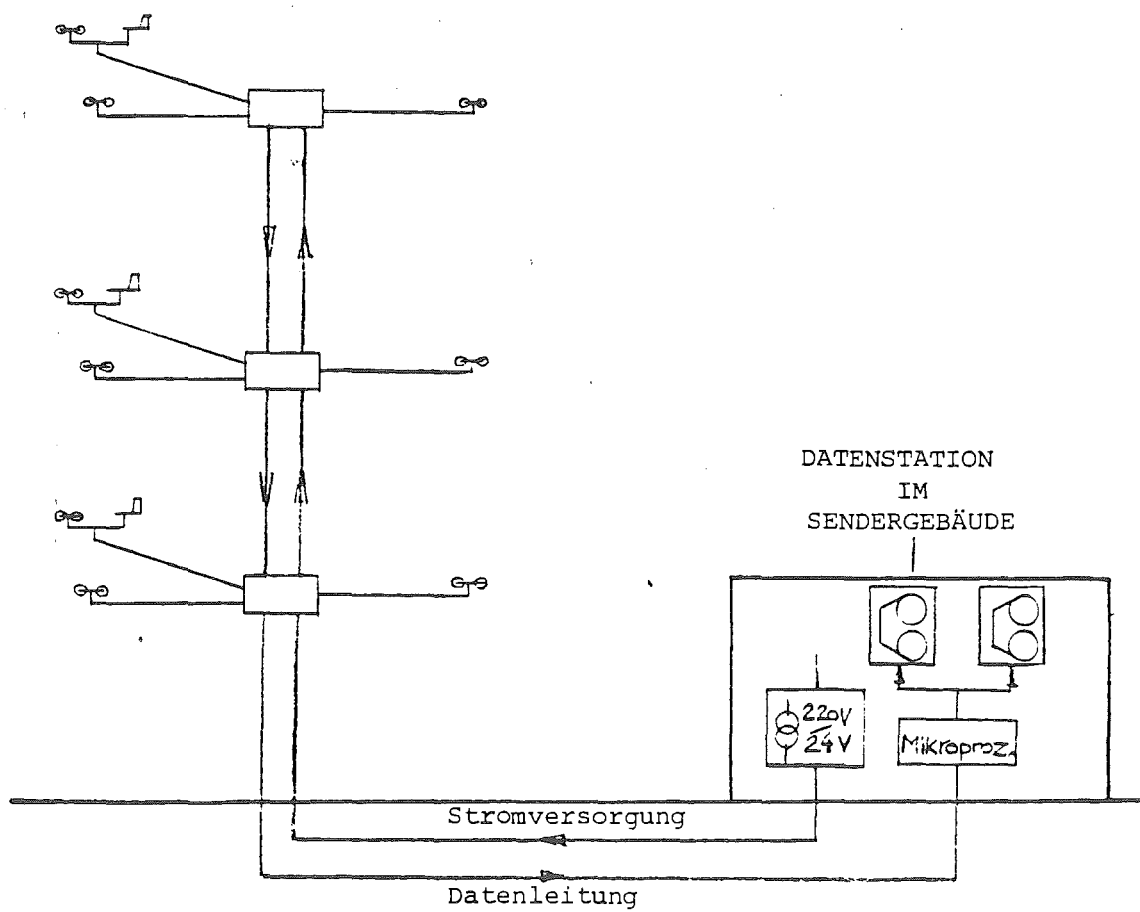


Fig. 2 b): Schematischer Aufbau der Meßanlage

Die Datenerfassung erfolgt in Datenstationen, die in den Sendergebäuden neben den Masten untergebracht sind: so kann die Anlage durch das Senderpersonal laufend überwacht werden. In einem Mikroprozessor-Steuergerät werden die Datenkanäle mit einer maximalen Frequenz von 1 Sekunde abgefragt und nach entsprechender Formatierung auf eines der beiden Bandgeräte abgespeichert.

Meist arbeitet die Meßanlage mit einem automatischen Zyklus: es wird ein Schwellwert für die Windgeschwindigkeit eingegeben. Wird dieser Schwellwert innerhalb einer Kalenderminute nie überschritten, werden 60 1-Sekundenwerte in einem Zwischenspeicher zusammengefaßt und gemittelt. Es wird ein 1-Minuten-Mittelwert abgespeichert. Wird innerhalb einer Minute der eingestellte Schwellwert auch nur einmal überschritten, dann werden 60 1-Sekunden-Werte aufgezeichnet. Neben dieser Schwellwertabfrage ist auch ein Betrieb mit einer beliebig wählbaren festen Mittelungszeit von 1-99 Sekunden möglich. Die Daten werden auf Magnetbändern abgespeichert, die direkt an der Großrechenanlage der Universität Regensburg verarbeitet werden können.

Am Standort Aurich wird seit Ende Januar kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet. Um einen Eindruck von der Art der erzielbaren Ergebnisse zu vermitteln, sollen einige exemplarische Daten vorgestellt werden. Ein Tag aus dem Auswertungszeitraum wurde herausgegriffen und es werden einfache statistische Kenngrößen sowie extreme Ereignisse dargestellt. Der 3. Februar 1981 wurde ausgewählt, da an diesem Tag über Norddeutschland ein Sturmtief hinwegzog, wodurch zeitweise Windgeschwindigkeiten von über 30 ms^{-1} erreicht wurden.

Die Fig.3 bis 5 sollen einen anschaulichen Überblick über die durchgeführten Messungen geben. Fig.3 zeigt die Stundenmittel der Windgeschwindigkeiten in den Höhen 58 m, 123 m und 196 m am 03.02.1981. Solche Stundenmittelwerte sollen in diesem Meßprogramm nur zur Charakterisierung der Windverhältnisse an einem bestimmten Tag benutzt werden. Interessanter ist die Aufzeichnung der 1-Minuten-Mittelwerte, in Fig.4 gezeigt für die Stunde von 6.00 bis 7.00 Uhr am 03.02.1981.

In dieser Aufzeichnung ist wiederum ein Zeitabschnitt markiert, die Minute von 6.15 bis 6.16 Uhr. Für diesen Zeitraum sind in Fig.5 die 1-Sekunden-Werte der Windgeschwindigkeit aufgezeichnet.

In Tab.1 sind für den 03.02.1981 Minima und Maxima der Windgeschwindigkeit für verschiedene Mittelungszeiträume dargestellt. Bei der Berechnung der Mittelwerte für die verschiedenen Mittelungszeiträume wurden auch die Variationskoeffizienten erfaßt.

Mittelungs- zeitraum T Meß- höhe z	24 h	12 h		4 h		1 h		10 min		1 min	
	Tagesmittel	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
58m	13.10	10.22	15.98	8.70	18.38	8.60	21.50	7.82	22.97*	6.66	27.11
123m	16.56	13.11	20.01	11.97	22.78	11.82	26.53	11.12	28.93	10.24	32.65
196m	19.19	15.42	22.96	14.87	26.30	14.73	29.47	14.27	31.66	11.86	34.55

*: Der maximale 10-min-Mittelwert für den 03.02.1981 betrug 22.97 ms^{-1} in 58 m Höhe.

Tab. 1: Minima und Maxima der Windgeschwindigkeit \bar{u}^T [ms^{-1}] für verschiedene Mittelungszeiträume T am 03.02.1981 und verschiedene Meßhöhen z.

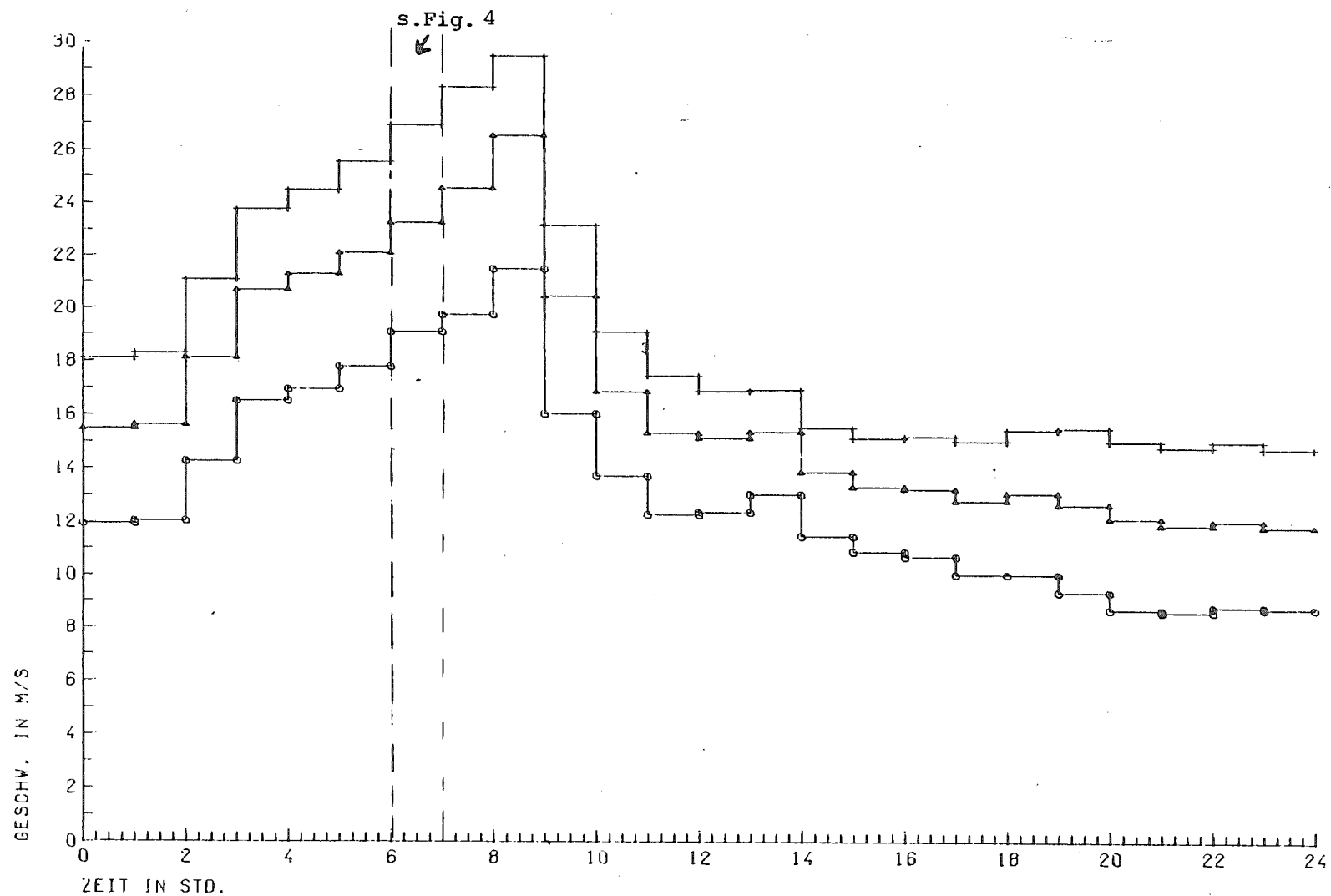


Fig. 3 : Stundenmittel der Windgeschwindigkeiten am 03.02.1981.

O-O: 58 m

Δ-Δ: 123 m

+ - +: 196 m

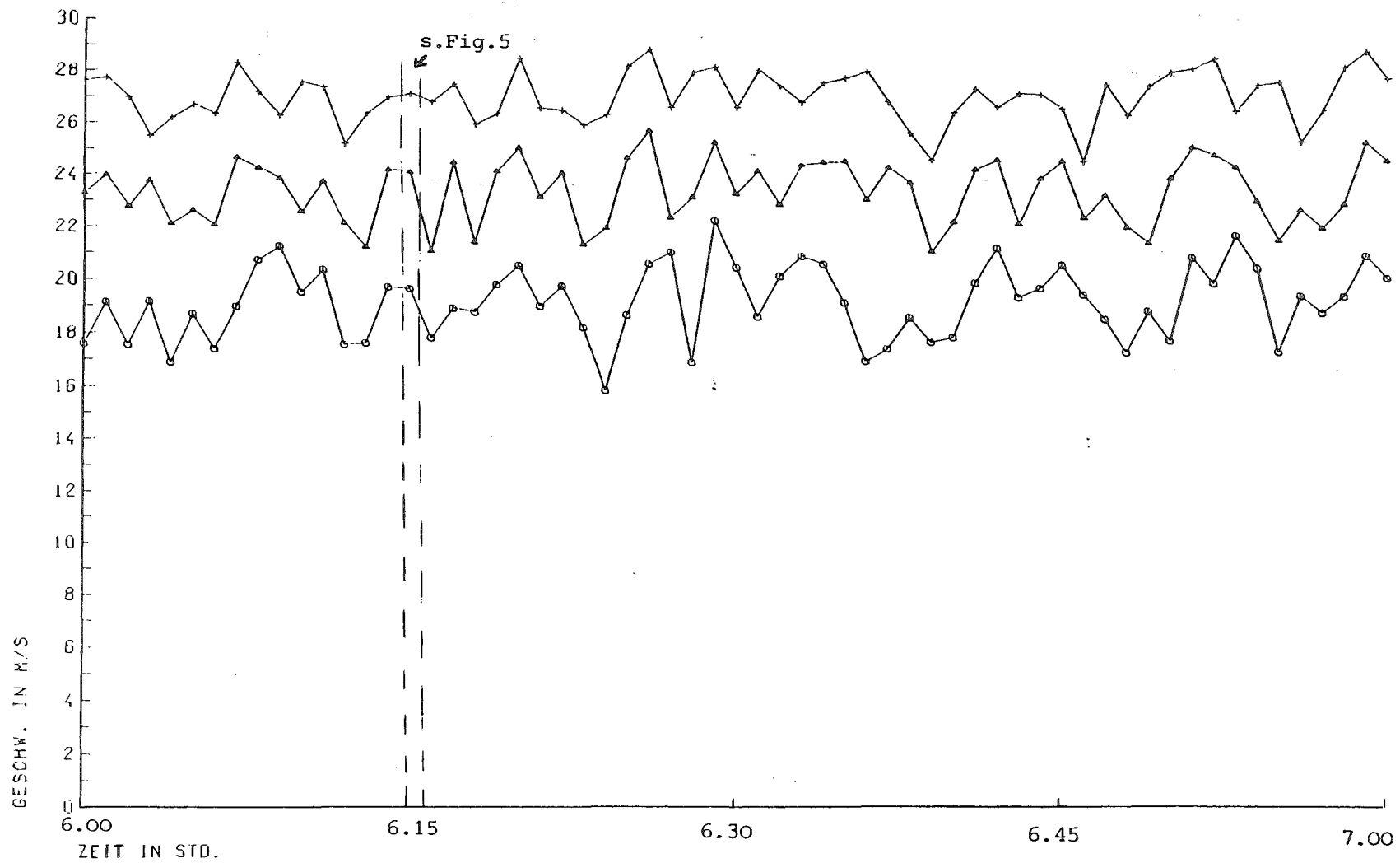


Fig. 4: Minutenmittel aus dem Meßzeitraum 03.02.1981, 6.00-7.00 Uhr.

O-O: 58 m

Δ-Δ: 123 m

+--: 196 m

Geschw. in m/s

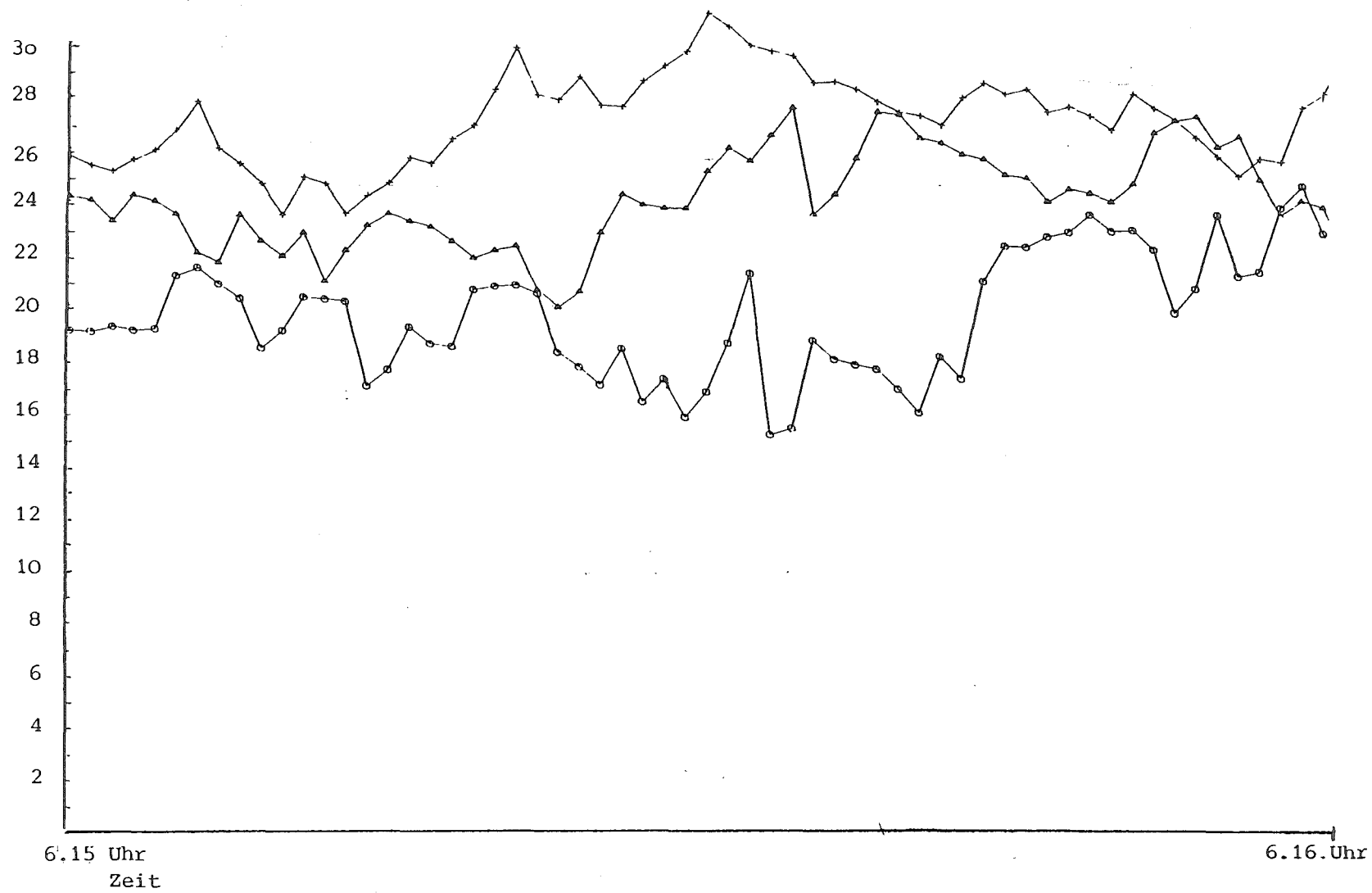


Fig. 5 : Sekundenwerte aus dem Meßzeitraum 03.02.1981, 6.15-6.16 Uhr.

O-O: 58 m

Δ-Δ: 123 m

+-+: 196 m

Aus Fig.5 ist gut zu erkennen, daß bei den hier durchgeführten Messungen Daten zu erhalten sind, die für Bau und Betrieb von großen Windkraftanlagen relevant sind: betrachtet man z.B. die vertikalen Windgeschwindigkeitsscherungen, sieht man Zeitpunkte, wo die Scherung zwischen 2 Meßhöhen gleich Null ist während gleichzeitig eine sehr große Scherung zur dritten Meßhöhe auftritt. Gemessene Werte für die maximalen und mittleren Scherungen sind in Tab.2 zusammengestellt.

	Höhendiff.	58m-123m		123m-198m		58m-196m	
Tag	Mittelungszeitraum τ	Max.	Mittel	Max.	Mittel	Max.	Mittel
3.2.81	1s	0.30	0.07	0.22	0.06	0.14	0.07
	1min	0.15	0.06	0.12	0.04	0.11	0.05

Tab.2: Maximale und mittlere Scherungen am 03.02.1981 für Sekunden- und Minutenwerte und verschiedene Meßhöhen.

Als weiterer Punkt sind von Interesse die Beschleunigungen, die in Fig.5 besonders ausgeprägt als negative Beschleunigungen auftreten. Tab.3 zeigt für den Zeitraum 6.02 bis 6.27 Uhr am 03.02.1981 maximale und mittlere Beschleunigungen.

Mittelungszeitraum τ'	1s			5s			10s		
Meßhöhe z	58m	123m	196m	58m	123m	196m	58m	123m	196m
Maximale Beschl.	6.30	5.27	6.07	1.36	1.23*	1.36	0.60	0.77	0.52
Mittlere Beschl.	1.20	0.95	0.83	0.33	0.29	0.26	0.18	0.16	0.13

*: Der Meßzeitraum 6.02-6.27 Uhr wurde in 5s-Abschnitte unterteilt und deren Mittelwerte berechnet. Dabei ergab sich als maximale Beschleunigung in 123m Höhe, d.h. als maximale Differenz zweier folgender Mittelwerte dividiert durch 5s, der Wert 1.23 ms^{-2} .

Tab. 3: Maximale und mittlere Beschleunigungen $\ddot{u}^{\tau'}$ [ms^{-2}] für den 03.02.1981 von 6.02-6.27 Uhr für verschiedene Meßhöhen z und verschiedene Mittelungszeiträume τ' .

Diese Beispiele sollten etwas über die Möglichkeiten des laufenden Meßprogrammes zeigen. Um gesicherte Aussagen zur Windcharakteristik machen zu können, ist es notwendig, die laufenden Messungen über einen längeren Zeitraum kontinuierlich fortzuführen, denn alle Daten müssen statistisch zu beschreiben sein. Weitere erste Ergebnisse sowie eine ausführliche Darstellung der Meßanlage sind dem Zwischenbericht für den Zeitraum 01.12.1979 bis 31.03.1981 [2] zu entnehmen, der über den Projektträger, die Projektleitung Energieforschung der Kernforschungsanlage Jülich angefordert werden kann.

LITERATUR

- [1] Obermair, G.: Bericht über das Projekt ET 4085: Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten einer großtechnischen Umwandlung von Windenergie in elektrische Energie unter Berücksichtigung eines Reserve- und Speichersystems
- [2] Berberich, K.; Beckröge, W.; Obermair, G.: Windmessungen in großen Höhen mit hoher Zeitauflösung, Zwischenbericht für das Projekt ET 4348 A/B, ATW-GmbH Regensburg.

Die Windverhältnisse im Küstenvorfeld der
Bundesrepublik Deutschland im Hinblick auf die
Windkraftnutzung (insbesondere Verbundnetzplanung)

H. Schmidt, Deutscher Wetterdienst

Der folgende Vortrag befaßt sich im wesentlichen mit den Extremwerten des Windes, sowohl in seinen Mittelwerten als auch in seinen Spitzenwerten, den sogenannten Maximalböen. Das zugrundeliegende Datenkollektiv wurde bereits in einem vorausgegangenen Vortrag dargestellt. Es besteht aus stündlich einem Zehnminutenmittelwert und dem zugehörigen Spitzenwind im gleichen Zehnminutenintervall über die Jahre 1971 - 1977 für ca. 45 Stationen, je Station also ca. 2 mal 50.000 Windwerte.

Die im folgenden dargestellte Untersuchung wird als eine der Grundlagen zur Verbesserung der DIN 1055, Windlasten dienen. Die Untersuchung befaßt sich mit der Ableitung der regionalen Verteilung von Schwellenwerten des Windes im Küstenbereich, u.a. des 50-Jahres-Windes und der 50-Jahre-Bö, die für die Bautechnik von besonderer Bedeutung sind. Windkraftwerke sind empfindliche Hochbauten während des Betriebes, vor allem aber während Wartungsarbeiten bei Senken und Heben der Gondel.

Das „normale“ Verfahren der Bestimmung solcher seltener Ereignisse besteht darin, aus einer möglichst langen Zeitserie

(min. 20 Jahre) des Windes die Häufigkeitsverteilung jährlicher Extrema mit Hilfe einer als bekannt vorausgesetzten Verteilungsfunktion (Typ Weibull oder Gumbel) auszugleichen und zu extrapolieren.

Diese Verfahren sind hier aus zwei Gründen nicht anwendbar:

- 1) Die jährlichen Extrema des mittleren Windes und besonders der Maximalböen überschreiten an einigen Küstenstationen regelmäßig die Meßgrenzen der verwendeten Meßgeräte und sind daher keine reellen Meßwerte.
- 2) Die Zeitserien sind mit 6 Jahren zu kurz (mit 6 Werten eine Statistik zu betreiben wäre bedenklich und nur bei besonders guten Daten vielleicht möglich).

Um diese Schwierigkeiten zu vermeiden, wurde am Seewetteramt ein Verfahren entwickelt, das eine Extrapolation bis zum „Jahrhundert“-Wind aus der Grundgesamtheit aller (z.B. stündlich) gemessenen Windwerte vornimmt. Als Beispiel für diese Prozedur, deren Ableitung hier nicht gegeben werden kann, möge die Abbildung 1 dienen. Sie zeigt für die Station Jever die empirische Verteilung der Böen und des Mittelwindes (Kreise) sowie die eingepaßten Verteilungsfunktionen (ausgezogen) und deren Extrapolation bis zum Jahrhundertwind.

Die angegebenen Schwellenwerte gelten für die Meßhöhe von 10 Metern. Schon eine Extrapolation der Mittelwinde auf (z.B.) 100 m ist schwer möglich. Im Küstenbereich, wo wir bei derartigen Orkanen eine neutrale Dichteschichtung annehmen können, sind für 100 m Höhe im Mittelwind etwa um 30 - 40 % höhere Werte zu erwarten, also etwa 50 m/s als Jahrhundertwind.

Für die Maximalböen sind uns keine vernünftigen Extrapolationsverfahren bekannt. Weil jedoch erwiesen ist, daß im Küstenbereich die maximalen Böen bei maximalem mittleren Wind (Orkan) auftreten, ist zumindest denkbar, daß Messungen (z.B. mit einem SODAR) hier Klarheit schaffen können. Im Binnenland werden

dagegen die Maximalböen von Gewittern hervorgerufen. Deren komplizierte Dynamik und räumliche enge Begrenztheit läßt die Bestimmung von Extrapolationsverfahren für Spitzenböen als unwahrscheinlich erscheinen.

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen die regionale Verteilung der Jahrhundertwerte des Mittelwindes und der Böen. Diese Darstellungen dürfen nur als ein erster Entwurf betrachtet werden. Insbesondere ist die Isotachenführung in den großen datenleeren Gebieten unsicher und richtet sich dort weitgehend nach orographischen und ökologischen Gegebenheiten. Überdies waren noch spezielle Eigenheiten der lokalen Umgebung des Aufstellungsortes einiger Windmesser zu berücksichtigen. Diese Hinweise sind als Plus- und Minuszeichen gegeben und bedeuten, daß aufgrund klimatologischer Erwägungen die betreffenden Werte für zu hoch bzw. zu niedrig erachtet werden müssen. Zu niedrige Werte (-) kommen vorwiegend dadurch zustande, daß Meßorte von Waldgürteln umgeben sind, die für die weitere Umgebung der Station untypisch sind. Dadurch wird insbesondere der mittlere Wind reduziert, die Maximalböen weniger.

Die wesentlichen Charakteristika der regionalen Verteilung der Jahrhundert-Werte sind das Eindringen hoher Winde in die Urstromtäler und die Asymmetrie in Schleswig-Holstein bezüglich Nord- und Ostsee. Das besonders tiefe Eindringen in den Raum Bremen scheint mit dem geringen Waldbestand im westlichen und nordwestlichen Vorfeld zusammenzuhängen, wie überhaupt sich ein wesentlicher Zusammenhang der regionalen Windverteilungen mit der Verteilung des Waldanteiles an der Gesamtfläche zeigt.

Für den Betrieb, insbesondere aber die Montage- und Wartungsarbeiten an Windkraftanlagen sind Informationen über den Jahresgang extremer Winde von Bedeutung. Das oben beschriebene

Kollektiv besteht aus zu wenig Daten für eine monatsweise Aufspaltung, daher wurde ein Sonderkollektiv genutzt, das aus kontinuierlichen Zehnminuten-Mittelwerten des Windes für 6 Jahre besteht (d.h. gut 300.000 Werte pro Station). Aus 2 Seestationen (FS „Elbe 1“ und „Weser“) wurde ein „See“-Kollektiv, aus 3 Landstationen (Helgoland, Bremerhaven und Cuxhaven) ein „Land“-Kollektiv.

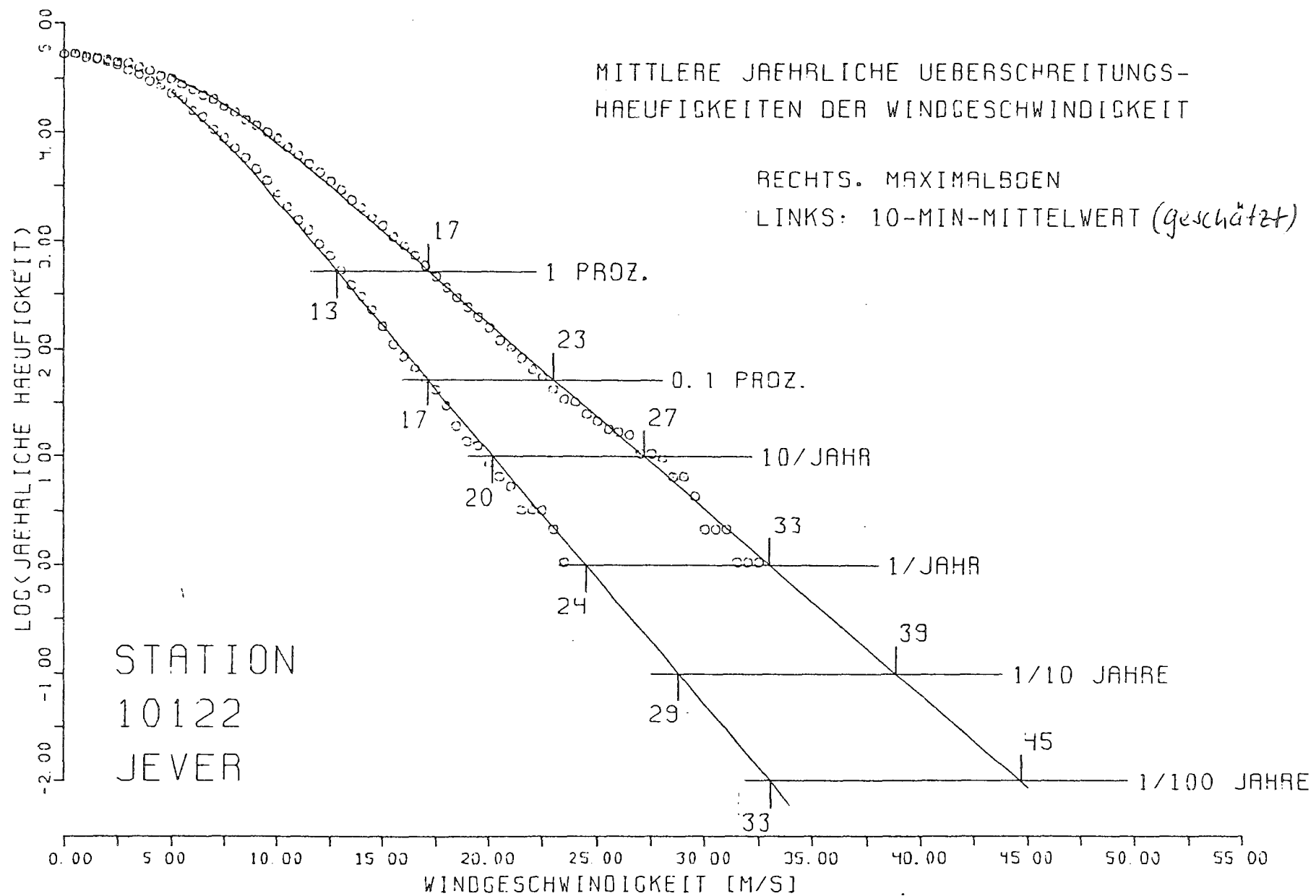
Nach monatsweiser Aufspaltung wurde die oben erwähnte Extrapolationsprozedur auf die jeweils ca. 75.000 („See“) bzw. 40.000 („Land“) Werte umfassenden Monatskollektive angewendet. Den Jahresgang des 50-Jahres-Windes in 10 m Höhe zeigt die Abbildung 4. Er weist ein breites Minimum in den Monaten Mai bis August und ein Maximum von November bis Januar auf. Der Unterschied zwischen Maximum (36 m s^{-1}) und Minimum (22 m s^{-1}) beträgt 14 m s^{-1} entsprechend 64 % des Minimalwertes. Da der Staudruck dem Quadrat der Windgeschwindigkeit proportional ist, ist der Unterschied für bautechnische Belange erheblich.

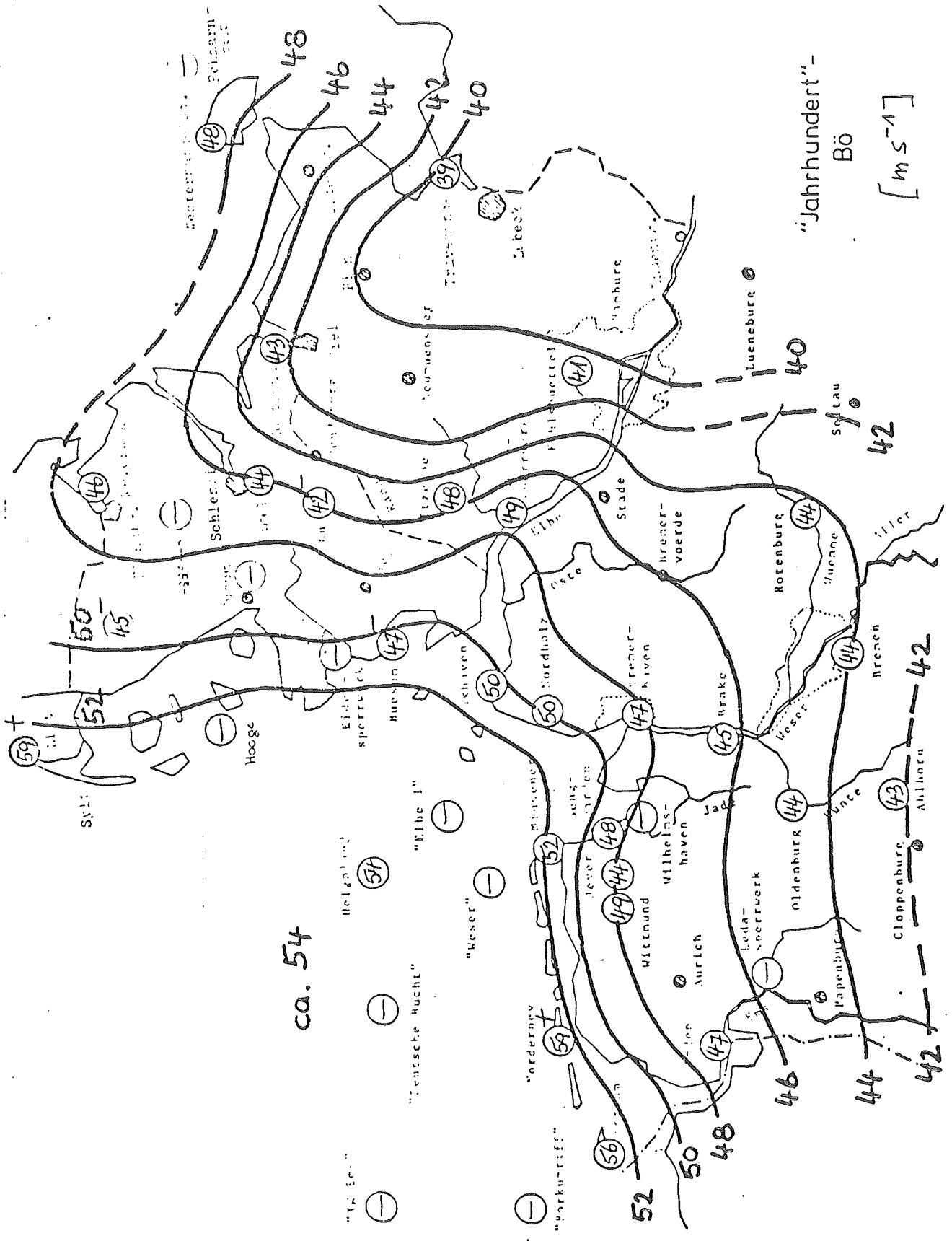
Mit aufgenommen wurde die Kurve für die Scilly-Inlands nach Carter und Challenor (1981), die aber für Stundenmittelwerte berechnet wurde. Diese ergeben aufgrund ihrer gegenüber Zehnminutenmittelwerten geringeren Varianz auch (um ca. 10 %) verringerte 50-Jahreswerte. Damit muß die Übereinstimmung als qualitativ und quantitativ gut bezeichnet werden.

Zur Extrapolation dieser Werte auf 100 m Höhe ist wieder zu bemerken, daß hier (in Küstennähe) neutrale Dichteschichtung bei Orkan angenommen werden kann. Damit ist bei einer Rauheitslänge von wenigen cm mit einiger Berechtigung eine Extrapolation mittels eines logarithmischen oder eines Potenzprofiles möglich, was einen Zuschlag von 30 - 40 %, also als Maximum in 100 m Höhe etwa 50 m s^{-1} , als Minimum ca. 30 m s^{-1} ergibt.

Das Wissen über das Böenverhalten ist ungleich geringer. Da es sich aber nicht um Gewitterböen sondern um Sturmböen handelt, scheint es möglich, eine sehr grobe Abschätzung über den mittleren Böenfaktor (mittleres Verhältnis von Maximalbö zum Mittelwind) zu erlangen. Wir setzen diesen knapp mit 1.2 an und erhalten für 100 m Höhe als 50-Jahresbö maximal (im Winter) 60 m s^{-1} , minimal (Sommer) 36 m s^{-1} . Diese Ergebnisse können nicht als verbindlich für Konstruktionen von Windgeneratoren angesehen werden. Deshalb sind zu diesem Thema für das Gebiet des Küstenvorfeldes dringend weitere Untersuchungen notwendig, die das Seewetteramt des Deutschen Wetterdienstes mittels eines SODAR-Gerätes an der Wetterstation List (Sylt) und am Eidersperrwerk durchführen will.

Abb. 1





"Jahrhundert"-
Bö
[m s⁻¹]

ca. 54

Abb. 3



Abb. 4

Vertikale Extrapolation der Windgeschwindigkeit
für Mittelwerte und Lastfälle

G. Tetzlaff, H. Laude, Universität Hannover

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
1. Einleitung.	1
2. Extrapolation auf 100 m Höhe für Daten des Monats September 1979.	2
2.1 Profilfunktionen.	2
3. Die Auswertung von 4 s - Mittelwerten aus einem Feldexperiment.	9
4. Windgeschwindigkeitsschwankungen in Höhen von 50 - 250 m über Grund.	11
5. Literaturverzeichnis.	15
6. Abbildungsverzeichnis.	18
7. Tabellenverzeichnis.	33

1. Einleitung.

Nicht an allen Orten, für die Informationen über das Windfeld benötigt werden, kann durch Messungen ein vollständiger Datensatz bereitgestellt werden, oft werden auch die Mittel fehlen, durch Einsatz eines numerisch-mathematischen Grenzschichtmodells Informationen zu erschließen. Fast immer werden jedoch Meßwerte aus dem Niveau von 10 m Höhe über Grund vorhanden sein. Daher ist es zur Beurteilung eines Standortes wichtig, Verfahren zu haben, die eine erste Abschätzung mit Hilfe von Extrapolationsverfahren gestatten. Eingeschlossen ist eine Beurteilung von Lastfällen in größeren Höhen.

2. Extrapolation auf 100 m Höhe für Daten des Monats September 1979.

2.1 Profilfunktionen.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist die Extrapolation der Windgeschwindigkeit auf 100 und 150 m Höhe.

Zur Extrapolation werden im wesentlichen zwei Ansätze verwendet. Das allgemeine Gesetz für diabatische Schichtung beschreibt das Windprofil ohne große Fehler bis in ca. 150 m Höhe (Carl et al., 1973).

Es gilt

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \left(\ln \frac{z}{z_0} - \psi\left(\frac{z}{L}\right) \right). \quad (2.1)$$

Dabei sind $\bar{u}(z)$ die Windgeschwindigkeit als Funktion der Höhe z , u_* die Schubspannungsgeschwindigkeit, k die von Karman Konstante und $\psi(z/L)$ eine vom Stabilitätsmaß z/L abhängige Funktion mit der Monin-Obukhov-Länge L . In der Praxis sind u_* und z_0 selten bekannt. Dann kann das Windprofil ersatzweise mit einem empirischen Potenzansatz (Panofsky, 1977; Frost und Long, 1978; Blackadar et al., 1974) beschrieben werden. In einem Höhenintervall z_1 bis z_2 gilt:

$$\frac{u(z_2)}{u(z_1)} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^p. \quad (2.2)$$

Blackadar et al. (1974) leiten den Exponenten p für diabatische Bedingungen ab, indem sie die Gleichungen 2.1 und 2.2 kombinieren. Aus 2.2 folgt:

$$p = \frac{\ln(u_2/u_1)}{\ln(z_2/z_1)}$$

$$p = \frac{\bar{z} \cdot \partial u}{u \cdot \partial \bar{z}} \quad \text{mit} \quad \frac{\partial u}{\partial \bar{z}} = \frac{u_*}{k \cdot \bar{z}} \cdot \phi\left(\frac{\bar{z}}{L}\right) \quad \text{und gl. 2.1}$$

ergibt sich p zu

$$p = \frac{\phi(\bar{z}/L)}{\ln(\bar{z}/z_0) - \psi(\bar{z}/L)} \quad \text{mit } \bar{z} = \sqrt{z_1 \cdot z_2} \text{ in m,} \quad (2.3)$$

Das p-Gesetz mit p aus Gleichung 2.3 ist eine relativ exakte Approximation des allgemeinen Gesetzes für diabatische Schichtung (Gl. 2.1), welches die Verhältnisse genau beschreibt (Sedefian, 1980).

Der Exponent p, der möglichst genau bestimmt werden muß, ist von der Profilform, also den Parametern z_0 , z_1 und z_2 , sowie von der Stabilitätsfunktion $\psi(\bar{z}/L)$ abhängig. Für die Stabilitätsfunktionen können die Dyer-Businger Beziehungen (Businger et al., 1971) eingesetzt werden. Es gilt

$$\text{Für } Ri = 0.0: \quad \phi = 1, \quad \psi = 0 \quad \text{Daraus folgt: } p = \frac{1}{\ln \bar{z}/z_0} \quad (2.4a)$$

$$Ri < 0.0: \quad \phi = \left(1 - 15 \frac{z}{L}\right)^{-1/4}$$

$$\psi = 2 \ln \left(\frac{1 + 1/\phi}{2} \right) + \ln \left(\frac{1 + 1/\phi}{2} \right) - 2 \arctan \frac{1}{\phi} + \pi/2 \quad (2.4b)$$

$$\text{(Paulson, 1970)}$$

$$Ri = z/L \quad \text{für } -10.0 < Ri < 0.0$$

$$Ri > 0.0: \quad \phi = 1 + 4.7 \frac{z}{L}$$

$$\psi = -4.7 \frac{z}{L} \quad (2.4c)$$

$$\frac{z}{L} = \frac{Ri}{1 - 4.7 Ri} \quad \text{für } 0.0 < Ri < 2.0$$

Damit sind bereits die Grenzen für die Extrapolation festgelegt. Sie ist mit dieser Theorie nur möglich, falls

$$-10.0 < Ri(\bar{z}) < 2.0.$$

Die Abb. 2.1 zeigt den Exponenten p nach Gleichung 2.3 als Funktion der Ri-Zahl, mit dem Scharparameter

z_0 . Für $Ri < 0.0$ bleibt p nahezu konstant, während für $Ri > 0.0$ p mit wachsender Ri -Zahl anwächst.

Die Parameter z_0 und Ri des Exponenten p können im Gegensatz zur mittleren Höhe \bar{z} nicht ohne Fehler bestimmt werden. Um den Einfluß dieser Größen auf den Fehler von p festzustellen, wurde eine Fehlerabschätzung durchgeführt.

z_0 sei fehlerfrei, und die Werte $z_1 = 46$ m, $z_2 = 100$ m, $z_0 = 0.50$ m und $u(1) = 8$ ms⁻¹ seien vorgegeben.

Zuerst erfolgte die Berechnung von p und u in 100 m Höhe mit einer als wahr angenommenen Ri -Zahl. Anschließend erhält diese Ri -Zahl einen Zuschlag von 5 bzw. 10 %, der als Fehler angenommen wird, und die Berechnung erfolgt nun mit der "fehlerbehafteten" Ri -Zahl. So erhält man den relativen Fehler von p bzw. u in 100 m Höhe. Die Abb. 2.2 und 2.3 zeigen die Ergebnisse.

Nach Abb. 2.2 kann der Exponent p im labilen Bereich fehlerfrei bestimmt werden. Bei stabilen Verhältnissen wird der Fehler 2 bis 4 % und wächst für $Ri > 0.10$ rasch weiter an. Gleiche Ergebnisse erhält man für den Fehler bezüglich der berechneten Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe. Es zeigt sich, daß die Windgeschwindigkeit $u(z_1)$ keinen Einfluß auf den relativen Fehler von $u(z_2)$ hat. Man beachte jedoch, daß die Abweichungen der Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe bei gleichem relativen Fehler für $u(z_2)$ von der Größenordnung der angenommenen wahren Windgeschwindigkeit abhängen.

Die Abb. 2.4 zeigt den Fehler von p , wenn man für $Ri(\bar{z}) < 0.05$ neutral rechnet und die Gleichung 2.3 für p den wahren Wert liefert.

Viele Autoren (Sedefian, 1980; Smedman-Högström, 1978) teilen die Stabilität mit Hilfe der Pasquill-Klassen ein und ordnen jeder Stabilitätsklasse ein mittleres \bar{p} zu. Dies bedeutet für Stundenmittelp Profile teilweise große Abweichungen zum wahren Wert.

Die Fehlerrechnung bezgl. z_0 , unter der Annahme Ri sei fehlerfrei, wurde ebenfalls durchgeführt. Dabei zeigte sich eine hohe Empfindlichkeit des Exponenten p auf den Fehler von z_0 . Damit der Fehler von p kleiner als 10 % bleibt, sollte z_0 im Zentimeterbereich auf ± 1 cm genau bestimmt werden. Für den Dezimeterbereich ($z_0 > 0.20$ m) reicht eine Genauigkeit von ± 10 cm aus.

Gerade im Zentimeterbereich kann diese Genauigkeit oft nicht erreicht werden.

Die Fehlerabschätzung erfolgte auch für den Fall, daß z_0 und Ri fehlerbehaftet sind. In den zwei folgenden Beispielen sei Ri jeweils mit einem Fehler von 10 % versehen.

- 1) z_0 wahr sei 0.05 m. In diesem Fall verdoppelt sich der Fehler von p bereits bei einem angenommenen z_0 von 0.10 m gegenüber dem Fehler, der sich ergibt, wenn nur Ri fehlerbehaftet ist.
- 2) z_0 wahr sei 0.60 m. Nun verdoppelt sich der Fehler erst, wenn z_0 0.90 m beträgt, also eine Abweichung von 30 cm zum wahren Wert aufweist.

Diese Fehlerrechnung zeigt, daß es einer sehr sorgfältigen Arbeitsweise bedarf, um die Unsicherheiten bei der Extrapolation der Windgeschwindigkeit auf 100 m bzw. 150 m Höhe in vertretbaren Grenzen zu halten.

Die Rauheitslänge z_0 wurde an der Station Tating für neutrale Stundenmittelprofile mit $v (12.5 \text{ m}) > 5 \text{ ms}^{-1}$ graphisch ermittelt.

Die Abhängigkeit der z_0 -Werte von der Windrichtung zeigt deutlich die Bedingungen in der Umgebung des Turmes (Abb. 2.5). Im Windrichtungssektor von 260° über 360° bis 60° liegen ebene Grasflächen, ohne größere Rauigkeitselemente. Diese Flächen erzeugen einen Wert \bar{z}_0 von etwa 0.05 m. Innerhalb des Richtungssektors von 100° bis 260° ist das Gelände durch Bäume, Häuser und Straßen in unterschiedlicher Entfernung strukturiert. Es ergibt sich ein Mittelwert von 0.25 m. Diese Werte entsprechen denen aus der Literatur erwarteten (Nowak et al., 1974).

Diese richtungsabhängigen Mittelwerte von z_0 wurden bei der Extrapolation der Windprofile vorgegeben.

Baumgartner (1977) gibt für Norddeutschland ein mittleres z_0 von 0.50 m an. Auch mit diesem Wert wurden die Stundenmittelprofile extrapoliert. Es ergibt sich jedoch ein zu großer Wert für die Windgeschwindigkeit in 100 und 150 m Höhe (siehe Tab. 2.1).

Die Extrapolation erfolgte am Beispiel Tating für den Monat September 1979.

Nicht extrapoliert wurden Profile mit einer Windrichtung zwischen 60° und 120° , da die Messungen vom Turm beeinflusst ($z_0 > 1.50 \text{ m}$) sein könnten. Ebenso entfallen alle Profile mit $Ri(\bar{z}) < -10.0$ und $Ri(\bar{z}) > 0.11$.

Dies sind insgesamt 16 % aller Stundenmittel.

Da grade diese Profile mit einer geringen Windgeschwindigkeit verbunden sind, weist das mittlere Profil ,

aus allen nach Blackadar et al. (1974) extrapolierten Stundenmittelprofilen größere Windgeschwindigkeiten auf, als das mittlere Profil, welches sich aus allen gemessenen 2-min-Mitteln des Monats September 1979 berechnet.

Nimmt man an, dieses eingeschränkte Monatsmittelprofil sei neutral und extrapoliert dieses nach Blackadar et al. (1974) mit einem graphisch bestimmten z_0 von 0.25 m, so erhält man dieselben Ergebnisse für u in 100 und 150 m Höhe, wenn man jedes einzelne Stundenmittelprofil mit Berücksichtigung der Stabilität und dem richtungsabhängigen z_0 von 0.05 bzw. 0.25 m extrapoliert und dann mittelt.

Es ist also zu erwarten, daß die Ergebnisse für u in 100 und 150 m Höhe recht gut sind, wenn man das mittlere Zwei-Minuten-Mittel-Profil mit $\psi = 0$ und graphisch ermitteltem z_0 von 0.30 m extrapoliert.

Da die Rauigkeitslänge z_0 oft nicht mit ausreichender Genauigkeit bekannt ist, bietet es sich an, ein Verfahren nach Justus und Mikhail (1976) zu verwenden.

Dort wird das Potenzgesetz (Gleichung 2.2) mit der von Reed (1975) verwendeten Profilfunktion verglichen. Dieser Ansatz bietet in der praktischen Anwendung den Vorteil, daß p nur eine Funktion von z_1 und $u(z_1)$ ist. Es gilt

$$p = \frac{0.37 - 0.0881 \cdot \ln(u_1)}{1 - 0.0881 \cdot \ln(z_1/10)} \cdot \frac{z_1 \text{ in m}}{u_1 \text{ in ms}^{-1}} \quad (2.5)$$

Das Profil des Monats September 1979 von Tating wurde zum Vergleich ebenfalls mit diesem Verfahren extrapoliert. Die berechneten Werte liegen oberhalb der nach Blackadar et al. (1974) berechneten Werte. Da Justus

et al. (1976) ihre Gleichung aus Messungen abgeleitet hatten, ist es fraglich, ob die Gleichung 2.5 auf jeden beliebigen Datensatz angewandt werden darf.

In der Literatur wird das Potenzgesetz (Gleichung 2.2) häufig mit einem konstanten $p = 1/7$ verwendet (Sedefian, 1980). Der Exponent ist nun weder von der Rauheitslänge z_0 , noch von der Stabilität der Schichtung abhängig. Ihm kann über die Gleichung 2.3 mit $\psi = 0$ ein z_0 von 0.06 m zugeordnet werden. Diese Rauheitslänge ist für einige Windrichtungen zu klein und liefert daher bei der Extrapolation nach oben zu niedrige Abschätzungen der Windgeschwindigkeit. Die Tabelle 2.1 faßt alle Ergebnisse zusammen.

Sedefian (1980) kommt nach Vergleichsmessungen ebenfalls zu dem Ergebnis, daß eine Extrapolation mit p aus Gleichung 2.3 die realistischsten Werte, grade für die Windenergieabschätzung, liefert.

3. Die Auswertung von 4 s - Mittelwerten aus einem Feldexperiment.

Während der Zeit vom 20. - 31. 10. 1979 wurde am Ort des Meßturms in Tating ein Feldexperiment durchgeführt. Eines der Ziele war es, Datensätze zu gewinnen, die auf Kurzzeitmittelwerten beruhten. Da für die Messungen Schalenkreuzanemometer zum Einsatz kamen, wurde das Mittelungsintervall auf 4 Sekunden festgelegt. So kann bei der Trägheitslänge der Anemometer von 4.5 m (Coppin et al., 1980) gewährleistet werden, daß auch noch für Windgeschwindigkeiten von weniger als 5 ms^{-1} ihre Schwankungen hinreichend genau wiedergegeben werden. In der Zeit vom 25. 10. - 30. 10. wurden während 72 Stunden am 46 m - Mast solche Daten aufgezeichnet.

Während des gesamten Zeitraumes herrschten östliche Windrichtungen vor, die Windgeschwindigkeit in 46 m Höhe war mit einem Mittelwert von 10.1 ms^{-1} für die Meßperiode höher als der Monatsmittelwert von 8.7 ms^{-1} und vergleichbar mit dem langjährigen Mittel von 8.4 ms^{-1} . Die Gleichmäßigkeit der Witterung drückt sich deutlich in den ermittelten Häufigkeitsverteilungen der 4 s - Werte aus. Abweichend von den charakteristischen schiefen Verteilungen der Wahrscheinlichkeitsdichte tritt hier zwischen etwa 6 und 12 ms^{-1} eine für jede Klasse von 1 ms^{-1} Breite etwa gleiche Häufigkeit auf. Der Abfall der Auftrittswahrscheinlichkeit zu niedrigen und hohen Werten ist steil. Auch im Monatsmittel für den Oktober 79 zeigen sich diese Verhältnisse.

Die 4 s - Werte wurden zur weiteren Untersuchung weiter gemittelt, um die Veränderung der Häufigkeitsverteilung mit wachsendem Mittelungsintervall zu bestimmen. Es wurden 12 s, 32 s, 2 min, 10 min, 30 min und 1 h als Mittelungsintervalle berechnet. Die Häufigkeitsverteilungen, hier für die Höhe 12 m dargestellt, zeigen eine Verminderung der Breite der Verteilung. Während auf 4 s - Basis immerhin noch mehr als 1 % aller Werte oberhalb 11 ms^{-1} lagen, wird bei den 1 h - Mittelwerten die 10 ms^{-1} -Grenze nicht mehr überschritten. Unterhalb 4 ms^{-1} liegen bei den 4 s - Werten 9 % der Werte, bei den 1 h - Werten nur noch knapp 3 % (Tab. 3.1). Diese Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit anderen Messungen.

Sollen daraus Änderungen für die Verteilungen von langjährigen Werten abgeleitet werden, ist die unterschiedliche Stabilität ebenso wie die Form der Verteilung zu berücksichtigen. Dazu eignet sich die Berechnung auf der Basis der Weibull-Verteilung sehr gut.

Für das Datenkollektiv der 4 s - Daten aus den drei Höhen 12 m, 26 m und 46 m wurden die Übergangswahrscheinlichkeiten berechnet. Dazu wurde die Häufigkeit ermittelt, mit der auf einen bestimmten Wert im nächsten Zeitintervall ein anderer (bzw. der gleiche) folgt (Tab. 3.2).

Nimmt man die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeitswerte und die Übergangswahrscheinlichkeit zusammen, so ist für repräsentative Datenkollektive eine Aussage möglich, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, daß von einem zu definierenden Wert ausgehend ein Schwellenwert über- oder unterschritten wird.

4. Windgeschwindigkeitsschwankungen in Höhen von
50 - 250 m über Grund.

Die klassische Vorstellung einer durch den Gradienten des Luftdruckes angetriebenen Grenzschicht der Atmosphäre gilt in den mittleren Breiten nach systematischen Auswertungen des Aufbaus der Grenzschicht und des geostrophischen Windes für etwa 75 % aller Fälle. Dabei wirkt auf die atmosphärische Grenzschicht die Kraft des Druckgradienten. Der Aufbau der Grenzschicht läßt sich in drei Schichten verstehen. In den untersten wenigen Millimetern trifft man die sog. laminare Grenzschicht an. In der darüberliegenden sog. Prandtl-Schicht bis etwa 50 m Höhe ändert sich die Windgeschwindigkeit mit der Höhe, die Richtung aber nur in sehr geringem Maße. Die Drehung der Windrichtung von der bodennahen Windrichtung auf die der freien Atmosphäre erfolgt in der Ekman-Schicht bis zu einer Höhe von etwa 1000 m (Abb. 4.1). Die Beschreibung der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe kann sich bei diesem Typ von atmosphärischer Grenzschicht auf einige bekannte Grundgesetzmäßigkeiten stützen und wird für Mittelwerte hauptsächlich durch zwei Ansätze, das logarithmische Windprofil oder den empirisch gewonnenen Potenzansatz beschrieben. Im Falle der Windgeschwindigkeitsschwankungen kann ausgehend von der Verteilung der turbulenten kinetischen Energie über die Frequenz eine systematische Verteilung über der Höhe in Abhängigkeit von der Höhe erschlossen werden. Das läßt sich auch ausdrücken als Abhängigkeit der charakteristischen Länge der Turbulenzkörper von der Höhe und anderen Parametern (Abb. 4.2). Eine andere Möglichkeit zur Darstellung der Windgeschwindigkeitsschwankungen ist mit

den Böigkeitsfaktoren gegeben. Dabei wird ein Mittelwert über einen kurzen Zeitraum, z.B. 1 s, durch den Mittelwert eines längeren Zeitraums, z.B. 10 Minuten, dividiert. Dabei kann auch die geostrophische Windgeschwindigkeit verwendet werden, um den Böigkeitsfaktor auszudrücken (Abb. 4.3). Eine Extrapolation von Böigkeitswerten und von Mittelwerten führt dann zu Überschreitungshäufigkeiten (Abb. 4.4). Es wird angegeben, welche mittlere Windgeschwindigkeit wie oft überschritten wird. Diese Darstellungen sind aus statistischen Verfahren, z.B. der Verwendung der Extremwertstatistik mit der Verwendung von Gumbel-Verteilungen gewonnen worden. Sie unterscheiden nicht den meteorologischen Prozeß, der die jeweiligen Werte der Windgeschwindigkeit hervorruft.

Es treten neben den druckgradienterzeugten Winden auch andere Windtypen auf. In konvektiver Bewölkung kommt es innerhalb der Wolke durch Verdunsten oder Schmelzen von Eisteilchen in einem Aufwindgebiet zur Erzeugung eines Kaltluftkörpers mit von seiner Umgebung unterschiedlicher Dichte. Im Verlaufe des konvektiven Prozesses hört der Aufwind auf und der Dichteunterschied wächst an, so daß der entstandene Kaltluftkörper abwärts fällt. Er breitet sich am Boden aus. An seiner Vorderseite (Abb. 4.5) bildet sich eine scharfe Begrenzung aus, die die "Fallbö" von der in die Wolke einströmende warme, feuchte Luft voneinander trennt. Diese Grenzschicht hat im Extremfall eine Dicke von nur wenigen hundert Metern (Abb. 4.6). Die Windscherung hat den maximalen Wert in Höhen von 100 - 300 m. Die Verhältnisse, die dort angetroffen werden, unterscheiden sich somit grundlegend von denen in 10 m Höhe, wo auch für diesen Prozeß eine Grenzschicht beobachtet wird.

Dieser hier nur kurz qualitativ angedeutete Prozeß ist in den inneren Tropen für nahezu alle Windgeschwindigkeitswerte von mehr als 10 ms^{-1} verantwortlich (Wendt, 1981). Allerdings wird auch in den mittleren Breiten sehr häufig Wind beobachtet, der durch ihn erzeugt wurde. Jede Schauer- oder Gewitterbö gehört dazu und eine quantitative Abschätzung zeigt, daß etwa während eines Zehntels aller Jahresstunden der Wind davon beeinflußt wird.

Konvektive Vorgänge, die durch die Überhitzung am Boden verursacht werden und vor allem bei schwachgradientigen Wetterlagen auftreten, sind etwa während einem Siebtel der Jahresstunden wirksam. Aber auch die stabile Grenzschicht führt in der Höhenstufe von 100 - 300 m zu Vorgängen, die vom Boden aus entweder nicht beobachtbar sind, oder aber völlig anders strukturiert sind. Mit wachsender nächtlicher Abkühlung wird in der Grenzschicht eine Beschleunigung und eine Drehung des Windvektors beobachtet. Die Beschleunigung führt zu Windgeschwindigkeitswerten von im Mittel etwa dem anderthalbfachen des geostrophischen Windes (Abb. 4.7). Am Boden nimmt die Windgeschwindigkeit auf z.T. sehr kleine Werte ab. Die Beschleunigung wird hervorgerufen durch das Freiwerden von potentieller Energie und die Umwandlung in kinetische Energie (Roth, 1981).

Damit zeigt sich, daß in 10 m Höhe über Grund die Messungen auch für die vertikal wenig mächtigen Prozesse der Gewitterböen und des Grenzschichtstrahlstroms stets innerhalb einer ausgebildeten Grenzschicht durchgeführt werden. Die statistische Häufigkeitsverteilung von Ereignissen wird daher dort durchaus mit einer unimodalen möglich sein. In den typischen Höhen

von 100 m Höhe ändern sich die Bedingungen jedoch soweit, daß die Kollektive voneinander zu trennen sind. Eine Extrapolation von Böenereignissen aus 10 m - Messungen auf größere Höhen dürfte daher nur sehr bedingt möglich sein.

5. Literaturverzeichnis.

- Baumgartner, A., Mayer, H., Metz, W.; 1977: Weltweite Verteilung des Rauigkeitsparameters z_0 mit Anwendung auf die Energiedissipation an der Erdoberfläche. Met. Rdsch., 30, 43-48.
- Blackadar, A.K., Panofsky, H.A., Fiedler, F.; 1974: Investigation of the turbulent wind field below 500 feet altitude at the eastern test range, Florida. NASA CR - 2438.
- Businger, J.A., Wyngaard, J.C., Izumi, I., Bradley, E.F.; 1971: Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. J. Atmos. Sci., 28, 181-189.
- Carl, D., Tarbell, T.C., Panofsky, H.A.; 1973: Profiles of wind and temperature from towers over homogeneous terrain. J. Atmos. Sci., 30, 788-794.
- Charba, J.; 1972: Gravity current model applied to analysis of squall-line gust front. NOAA Tech. Memo. ERL NSSL - 61, Norman, Okla., 66 pp.
- Coppin, P.A., Tetzlaff, G.; 1980: Grundlagen für ein meteorologisches Meß- und Versuchsprogramm GROWIAN. Inst. f. Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover.
- Hill, H.G.; 1978: Untersuchungen über Windmaxima innerhalb der stabilen Grenzschicht. Dipl. Arb. Univ. Hamburg, 66 S.

- Huang, C.H., Fichtl, G.H.; 1979: Gust-rise exceedance statistics for wind turbine design.
Prepared for the U.S. department of energy under contract eY-76-C-06-1830; PNL-2530, UC-60, Pacific northwest laboratory, Richland, Washington.
- Justus, G.G., Mikhail, Amir; 1976: Height variation of wind speed and wind distribution statistics. Geophys. Res. Letters, 3, 261-264.
- Malberg, H. et al.; 1978: Ein einfacher Ansatz für eine objektive lokale Böenvorhersage. Met. Rdsch., 31, 37-41.
- Nowak, D., Frost, W.; 1977: Handbook of wind turbine generator siting techniques relative to two-dimensional terrain features. Nov. 30, 1977, Contract No. E(45-1)-2443 Report.
- Panofsky, H.A.; 1977: Wind structure in strong winds below 150 m. Wind Eng. Vol. 1, No. 2, 91-103.
- Paulson, A.; 1970: The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. J. Appl. Meteorol., 9, 857-861.
- Reed, J.W.; 1975: Wind power climatology of the United States Sandia Laboratories. SAND 74-0348, June 1975.
- Roth, R.; 1981: Der Grenzschichtstrahlstrom. Vortrag in Köln, 5.3.81.

Sedefian, L.; 1980: On the vertical extrapolation of mean wind power density. J. Appl. Met., 19, 488-493.

Smedman-Högström, Ann-Sofi, Högström, Ulf; 1978: A practical method for determining wind frequency distributions for the lowest 200 m from routine meteorological data. J. Appl. Met. 17, 942-953.

Wendt, S.; 1981: Windgeschwindigkeitsverhältnisse in den verschiedenen Klimazonen. Unveröff. Manuskript, Inst. f. Meteorologie u. Klimatologie d. Universität Hannover.

6. Abbildungsverzeichnis.

Abb. 2.1: Der Exponent des Potenzgesetzes nach Gl. 2.3 als Funktion der Richardsonzahl.

Abb. 2.2: Der relative Fehler der mit dem Potenzgesetz (Gl. 2.2) berechneten Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe als Funktion des angenommenen relativen Fehlers von p .

Abb. 2.3: Der relative Fehler von p als Funktion der Richardsonzahl. Hierbei wurde ein relativer Fehler der Richardsonzahl von 5 % bzw. 10 % angenommen.

Abb. 2.4: Vergleichende Berechnung des Exponenten p für neutrale und diabatische Schichtung (Gl. 2.3).

Abb. 2.5: Die Rauigkeitslänge z_0 in Abhängigkeit von der Windrichtung für den Standort Tating.

Abb. 2.6: Mittlere Profile für Tating im September 1979, extrapoliert nach Blackadar et al. (1974) mit $z_1 = 46$ m.

Abb. 4.1: Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht.

Abb. 4.2: Charakteristische Länge der Turbulenz über der Höhe (nach Huang und Fichtl, 1979).

- Abb. 4.3: Böenquotient in Abhängigkeit von der geostrophischen Windgeschwindigkeit (nach Malberg et al., 1978).
- Abb. 4.4: Überschreitungshäufigkeit für Windgeschwindigkeitsänderungen in Abhängigkeit vom Mittelungsintervall (nach Huang und Fichtl, 1979).
- Abb. 4.5: Prinzipskizze zur Entstehung von Gewitterböen.
- Abb. 4.6: Schnitt durch eine Gewitterbö parallel zur Verlagerungsrichtung der Gewitterzelle (verändert nach Charba, 1972).
- Abb. 4.7: Beispiel für einen Grenzschichtstrahlstrom. Messung am Funkmast Hamburg-Billwerder, (Hill, 1978), am 4.11. - 5.11.1976.

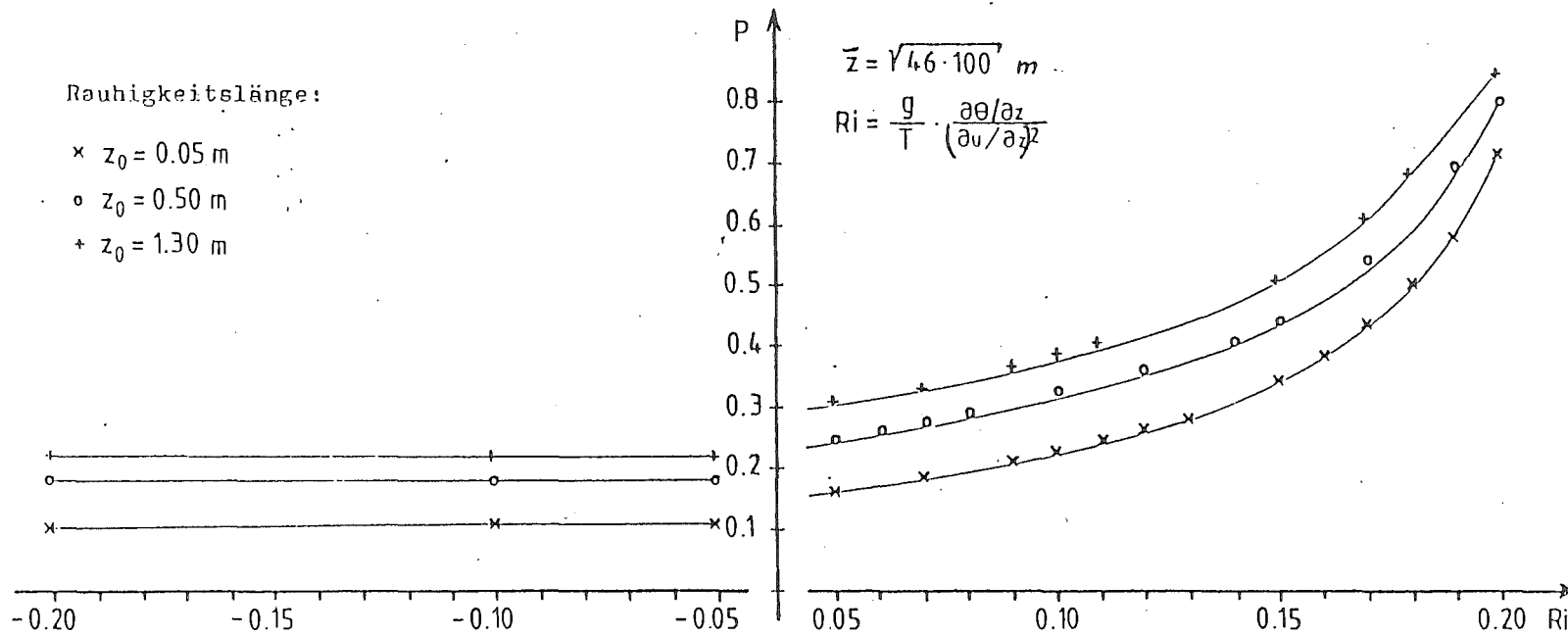


Abb. 2.1: Der Exponent des Potenzgesetzes nach Gl. 2.3 als Funktion der Richardsonzahl.

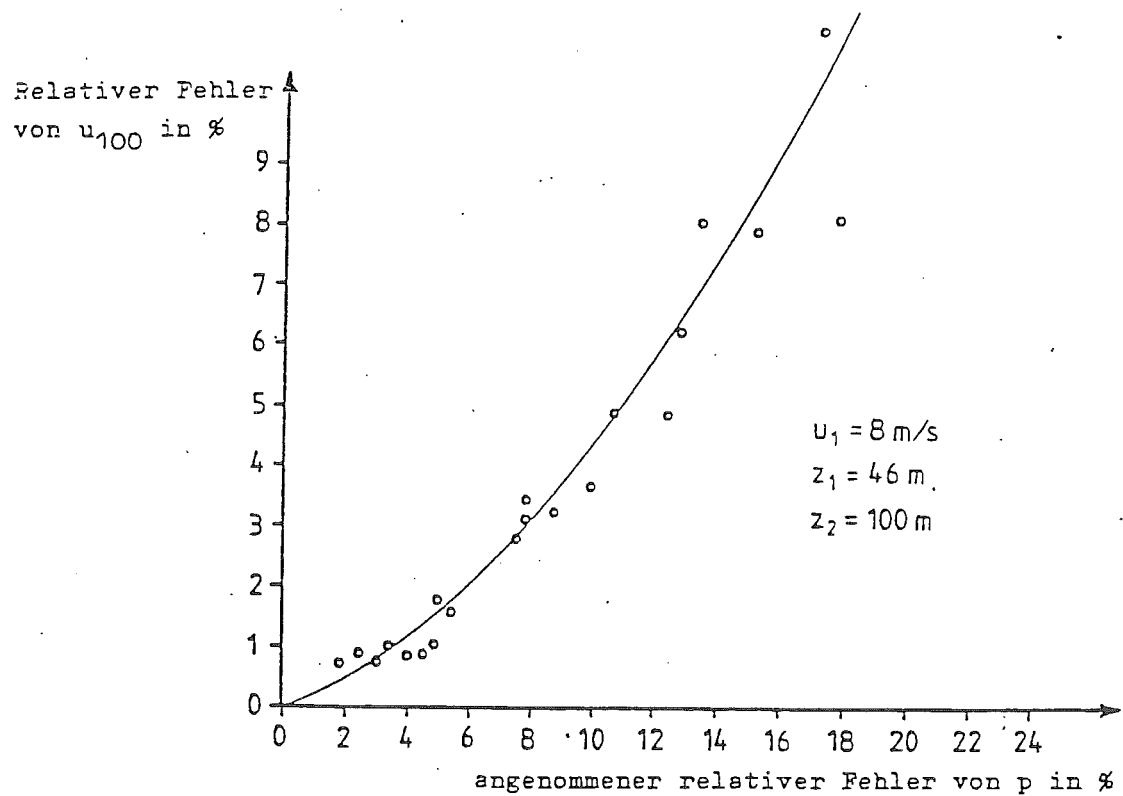
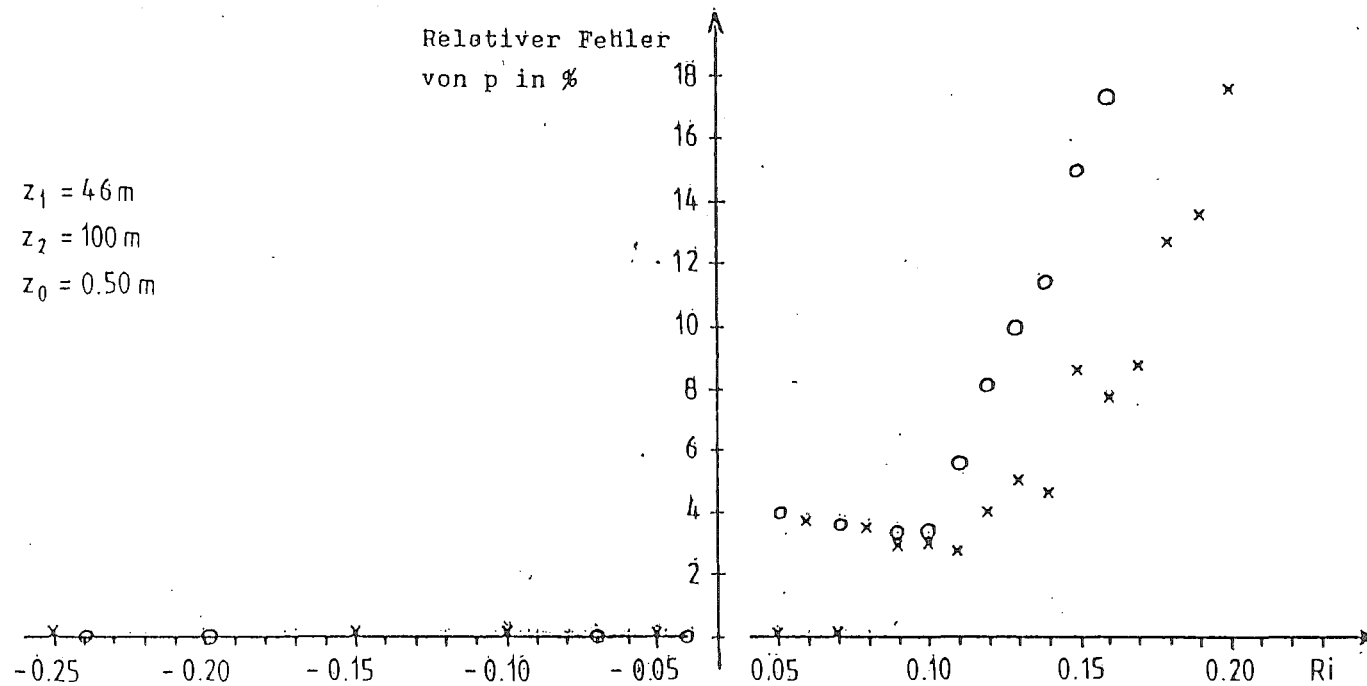


Abb. 2.2: Der relative Fehler der mit dem Potenzgesetz (Gl. 2.2) berechneten Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe als Funktion des angenommenen relativen Fehlers von p .



Fehler bezgl. der Richardsonzahl Ri von 5 % (x) bzw. von 10 % (o)

Abb. 2.3: Der relative Fehler von p als Funktion der Richardsonzahl. Hierbei wurde ein relativer Fehler der Richardsonzahl von 5 % bzw. 10 % angenommen.

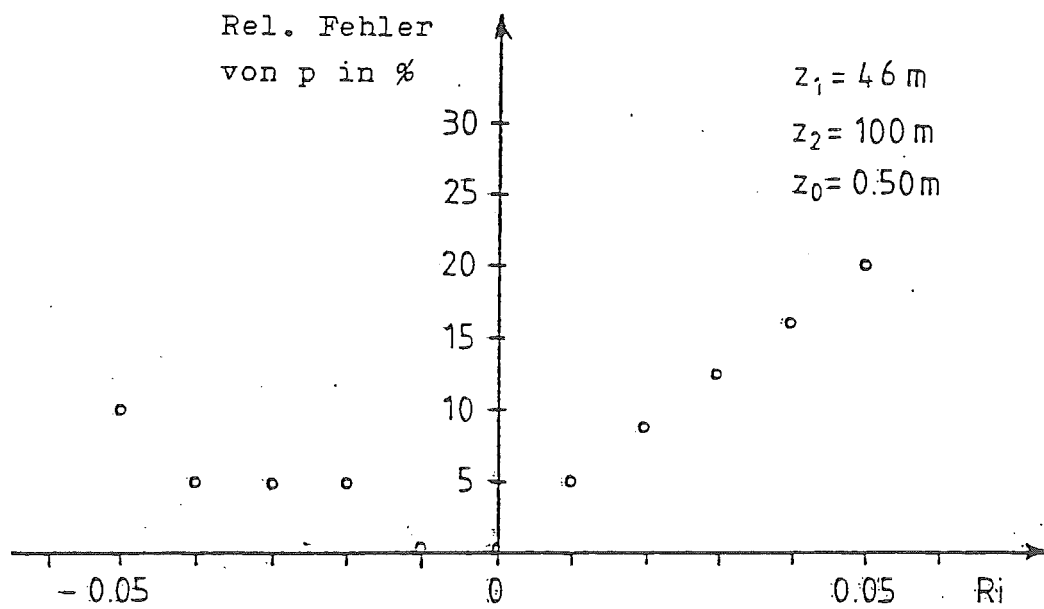


Abb. 2.4: Vergleichende Berechnung des Exponenten p für neutrale und diabatische Schichtung (Gl. 2.3).

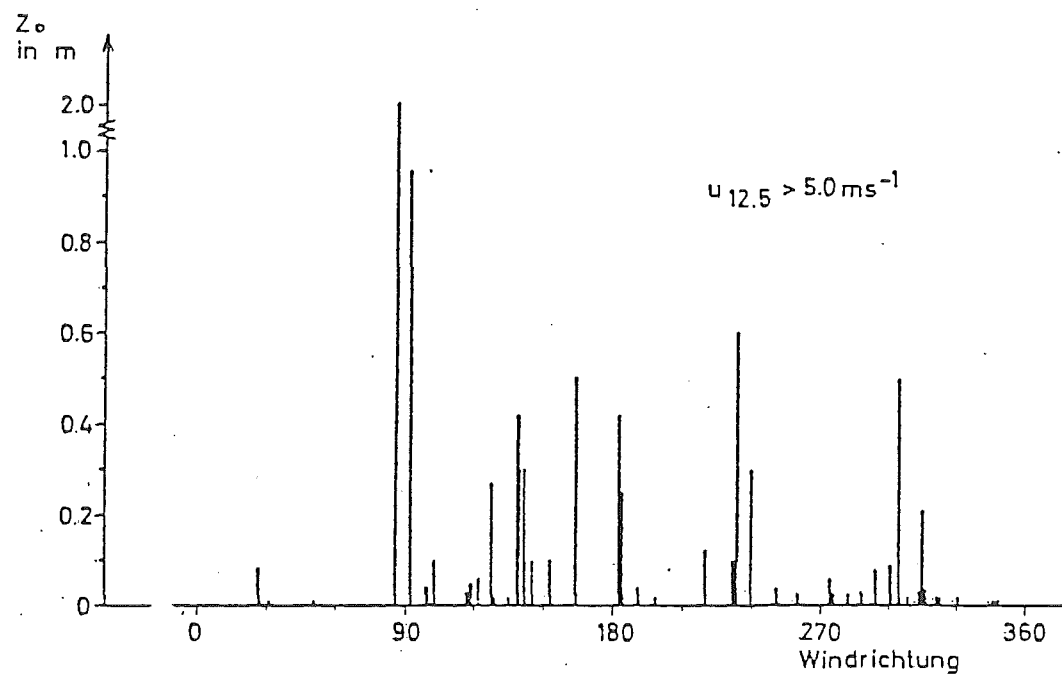
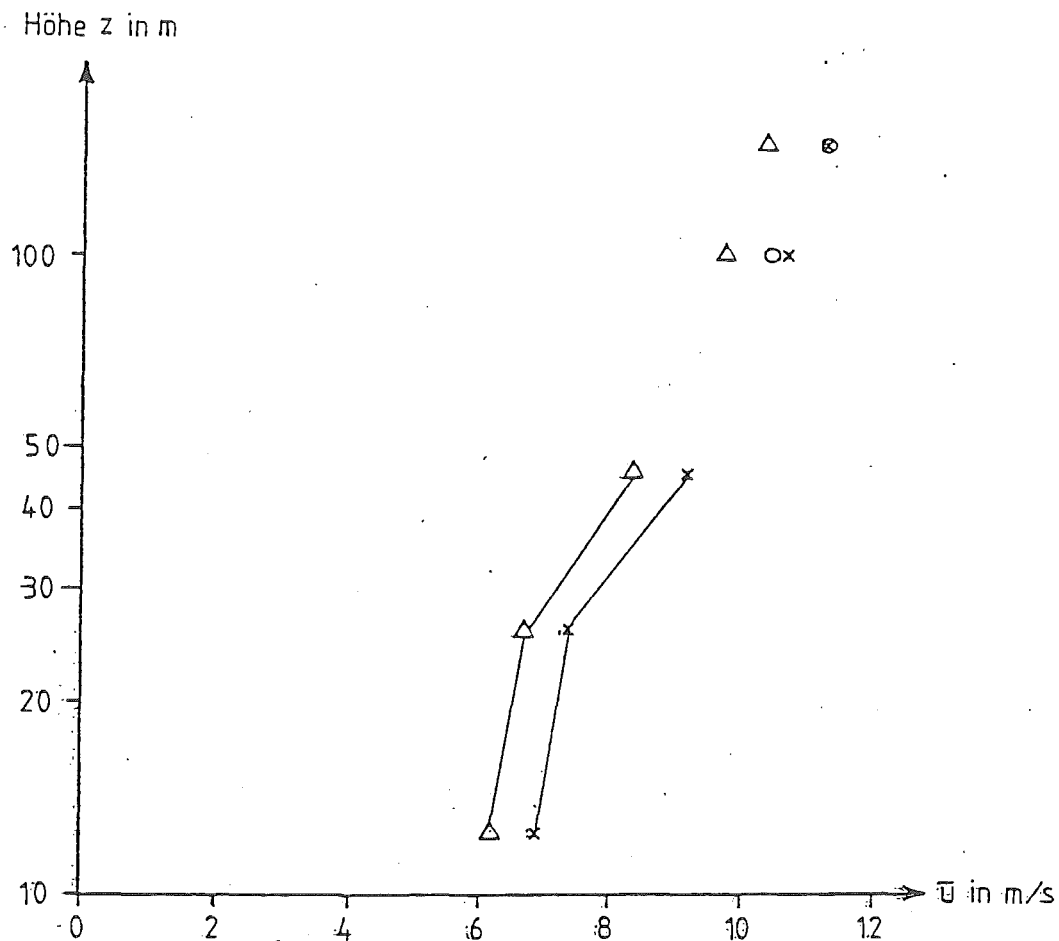


Abb. 2.5: Die Rauigkeitslänge z_0 in Abhängigkeit von der Windrichtung für den Standort Tating.



- Δ Mittleres Profil aus allen Zwei-Minuten Mitteln mit $z_0 = 0,30\text{m}$ und $\gamma(z/L) = 0$ extrapoliert.
- \times Mittleres Profil mit $z_0 = 0,25\text{m}$ und $\gamma(z/L) = 0$ extrapoliert.
- \circ Einzelne Stundenmittel mit richtungsabhängigem z_0 und unter Berücksichtigung der Stabilität extrapoliert.

Abb. 2.6: Mittlere Profile für Tating im September 1979, extrapoliert nach Blackadar et al. (1974) mit $z_1 = 46\text{ m}$.

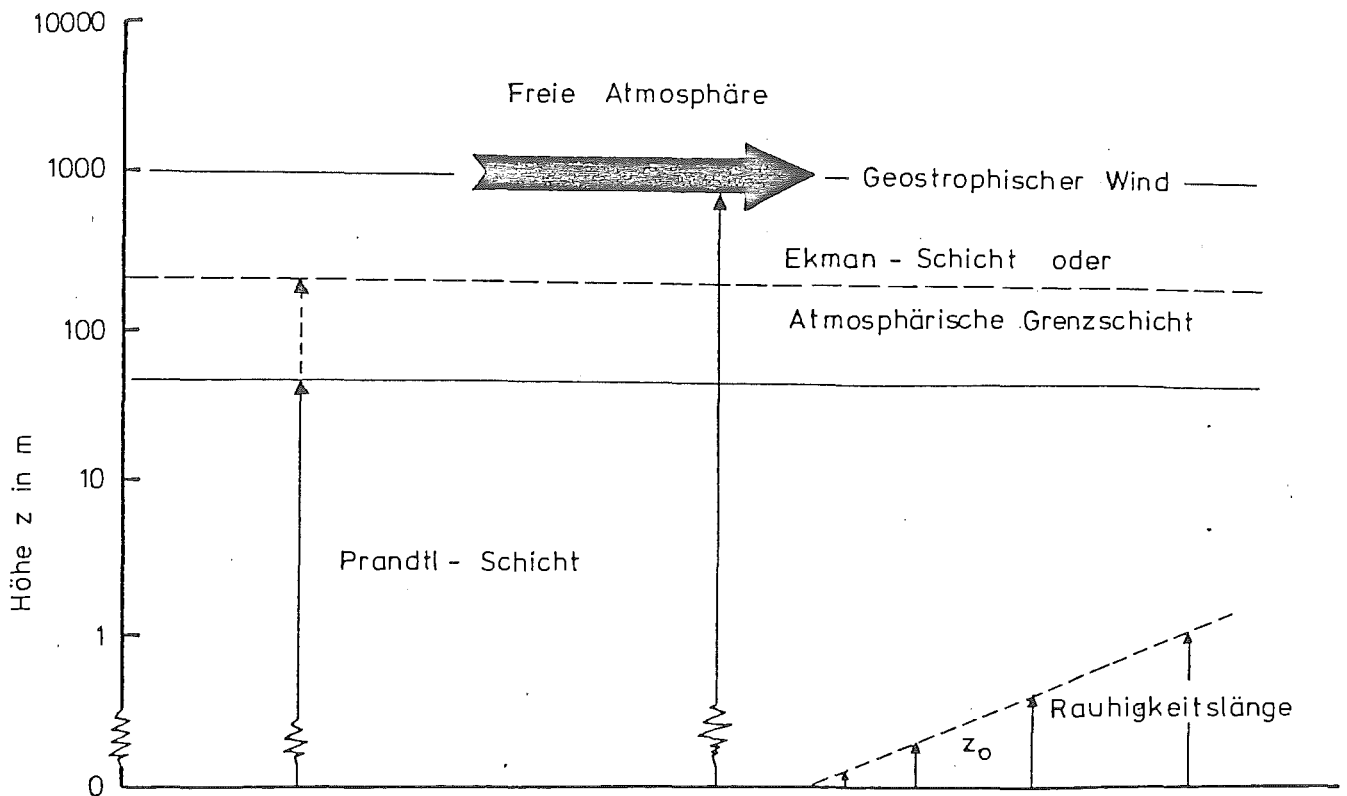


Abb. 4.1: Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht.

Vertikale Windprofile in der Prandtl-Schicht

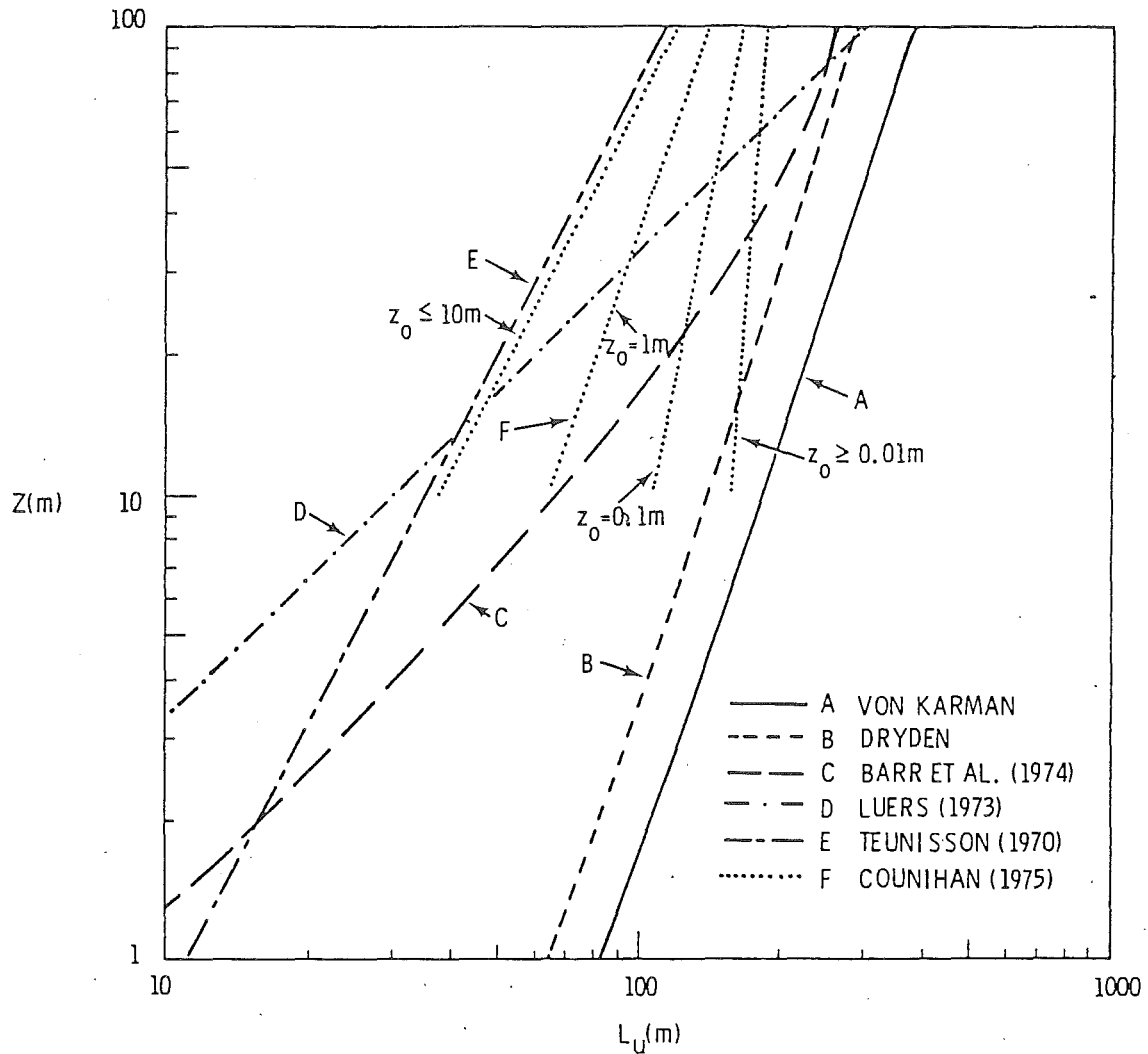
$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{\alpha} \left(\ln \frac{z}{z_0} + \beta \frac{z}{L} \right) \quad \text{Logarithmischer Ansatz}$$

$$\bar{u}(z_2) = \bar{u}(z_1) \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^p \quad \text{Potenzansatz}$$

β, α empirische Konstanten

u_* Schubspannungsgeschwindigkeit

L Stabilitätsparameter



LONGITUDINAL LENGTH SCALE COMPARISONS

Abb. 4.2: Charakteristische Länge der Turbulenz über der Höhe (nach Huang und Fichtl, 1979).

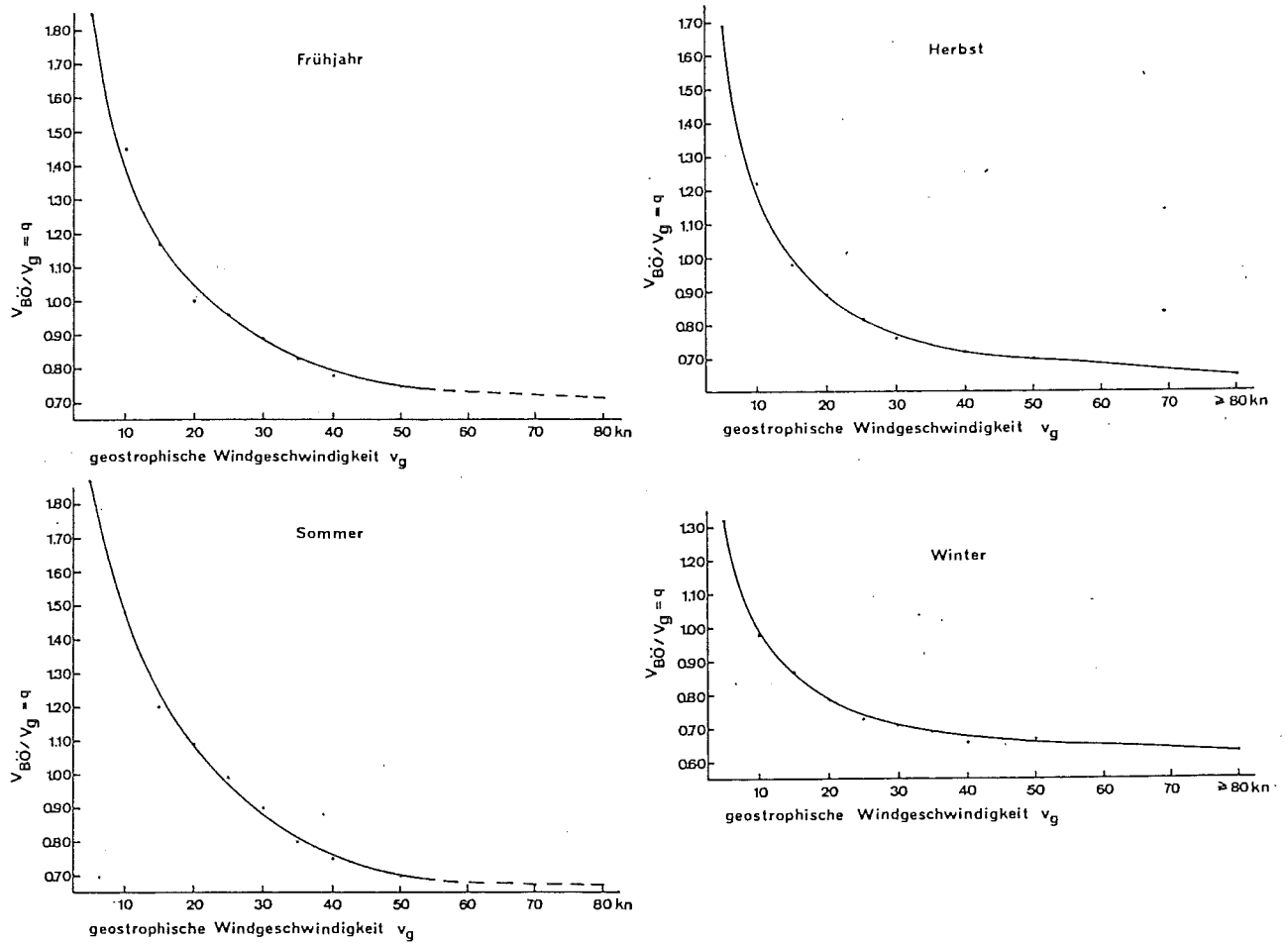
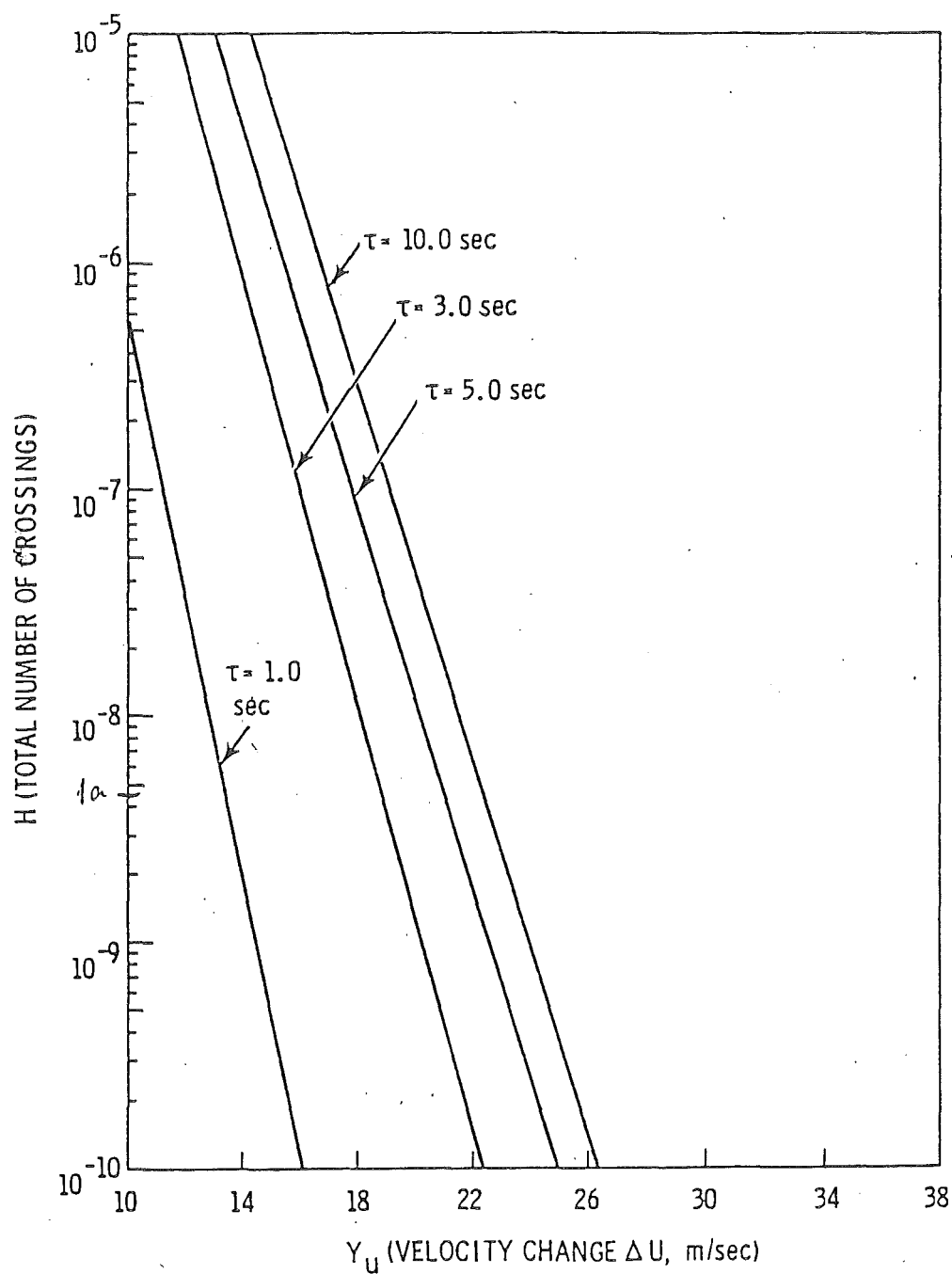


Abb. 4.3: Böenquotient in Abhängigkeit von der geostrophischen Windgeschwindigkeit (nach Malberg et al., 1978).



Relationship Between the Temporary Velocity Changes
and the Total Number of Crossings

Abb. 4.4: Überschreitungshäufigkeit für Windgeschwindigkeitsänderungen in Abhängigkeit vom Mittelungsintervall (nach Huang und Fichtl, 1979).

Gewitterböen

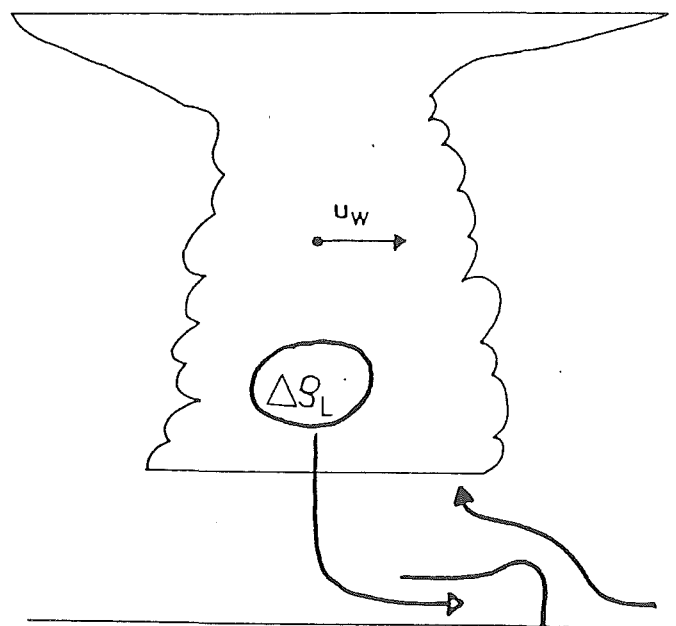


Abb. 4.5: Prinzipskizze zur Entstehung von Gewitterböen.

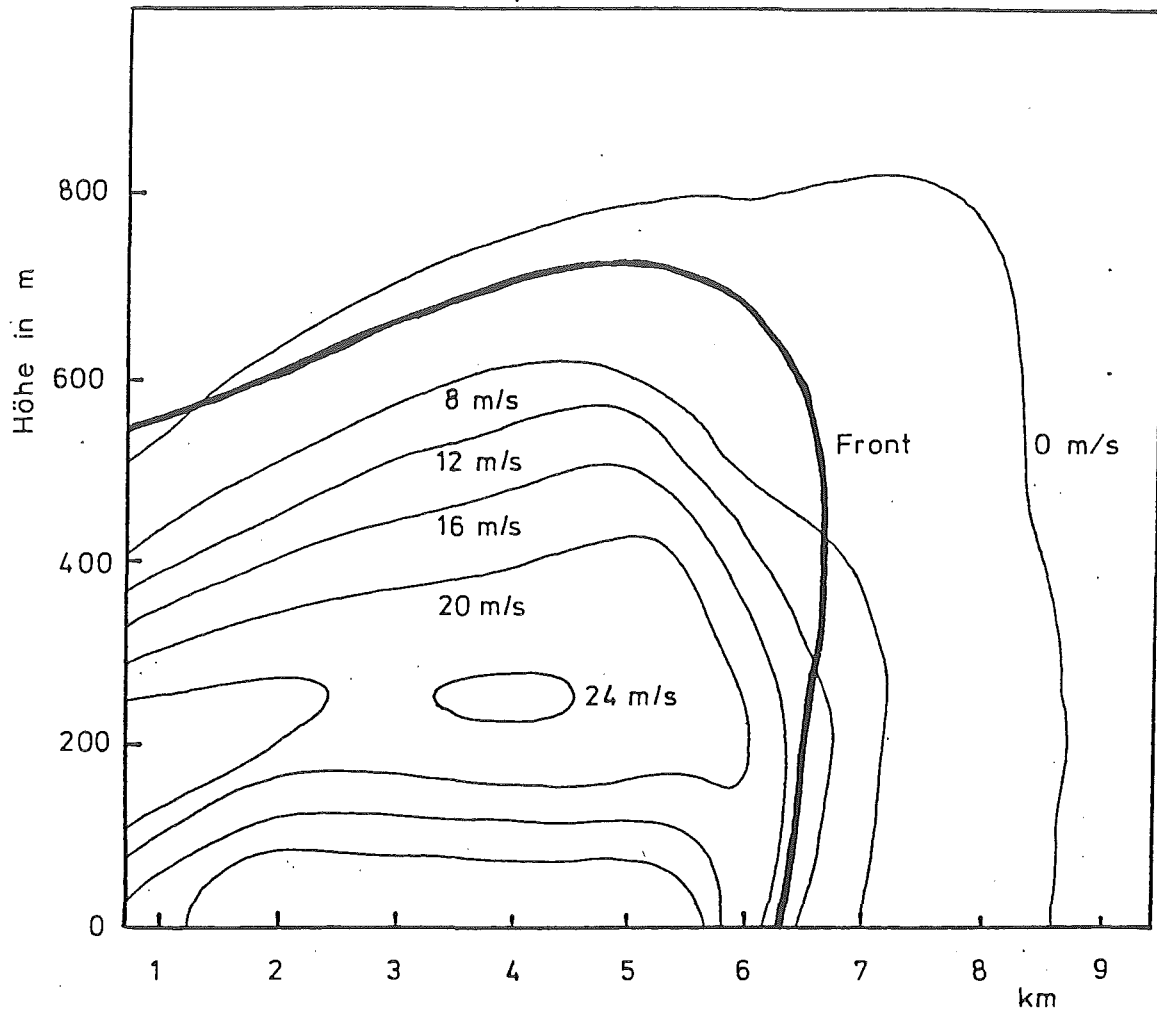


Abb. 4.6: Schnitt durch eine Gewitterböe parallel zur Verlagerungsrichtung der Gewitterzelle (verändert nach Charba, 1972).

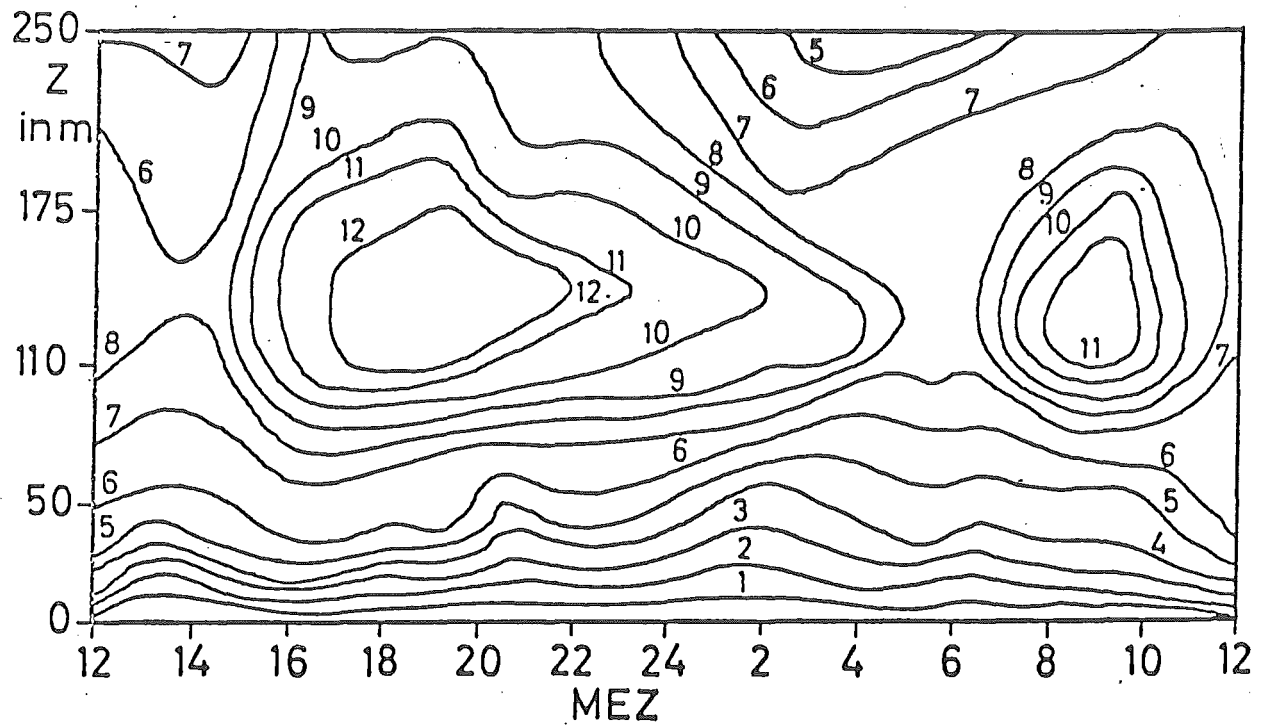


Abb. 4.7: Beispiel für einen Grenzschichtstrahlstrom.
Messung am Funkmast Hamburg-Billwerder,
(Hill, 1978), am 4.11. - 5.11.1976.

7. Tabellenverzeichnis.

Tab. 2.1: Ergebnisse der Extrapolation auf 100 bzw.
150 m Höhe für Tating im September 1979
($z_1 = 46$ m).

Tab. 3.1: Mittlere Windverhältnisse an der Station
Tating.

Tab. 3.2: Übergangswahrscheinlichkeit.

Tab. 2.1: Ergebnisse der Extrapolation auf 100 bzw. 150 m Höhe für Tating im September 1979 ($z_1 = 46$ m).

Extrapolationsmethode	u_{100} in ms^{-1}	u_{150} in ms^{-1}
Alle 2-Min-Mittel gemittelt $v_{12.5\text{m}} = 6.2 \text{ ms}^{-1}$ $v_{26\text{m}} = 6.7 \text{ ms}^{-1}$ $v_{46\text{m}} = 8.4 \text{ ms}^{-1}$		
1) Alle Stundenmittel mit $p=1/7$	9.4	10.0
2) Mittleres Profil nach Blackadar et al. (1974), $P = \frac{1}{\ln(z/z_0)}$, $z_{0\text{gr}} = 0.30 \text{ m}$	9.7	10.4
3) Mittleres Profil nach Justus et al. (1974)	9.9	10.8
Eingeschränktes mittleres Stundenmittelprofil $v_{12.5\text{m}} = 6.9 \text{ ms}^{-1}$ $v_{26\text{m}} = 7.4 \text{ ms}^{-1}$ $v_{46\text{m}} = 9.2 \text{ ms}^{-1}$		
1) Mittleres Profil mit $p=1/7$	10.3	10.9
2) Mittleres Profil mit $P = \frac{1}{\ln(z/z_0)}$, $z_{0\text{gr}} = 0.25 \text{ m}$	10.6	11.3
3) Stundenmittel nach Blackadar (1974) mit $z_0 = 0.05$ bzw. 0.25m gemittelt	10.5	11.3
4) Stundenmittel nach Blackadar (1974) mit $z_0 = 0.50\text{m}$	10.9	11.9
5) Mittleres Profil nach Justus et al. (1974)	10.8	11.7

siehe auch Abb. 2.6

Tab. 3.1: MITTLERE WINDVERHAELTNISSESTATION : TATINGMESSHOEHE : 12MZEITRAUM : 25.10. - 30.10.79DATENART : 4 SEKUNDEN - MITTELWERTE

I WINDGESCHWINDIGKEIT I	I HAEUFIGKEITEN IN % I		
	I REL.	CUM.	I
I VON .5 BIS < 1 M/S	I 0.00	0.00	I
I VON 1 BIS < 2 M/S	I 0.00	0.00	I
I VON 2 BIS < 3 M/S	I 0.83	0.84	I
I VON 3 BIS < 4 M/S	I 8.21	9.05	I
I VON 4 BIS < 5 M/S	I 14.47	23.52	I
I VON 5 BIS < 6 M/S	I 21.32	44.84	I
I VON 6 BIS < 7 M/S	I 16.75	61.58	I
I VON 7 BIS < 8 M/S	I 17.71	79.30	I
I VON 8 BIS < 9 M/S	I 10.75	90.05	I
I VON 9 BIS < 10 M/S	I 6.65	96.70	I
I VON 10 BIS < 11 M/S	I 2.27	98.97	I
I VON 11 BIS < 12 M/S	I 0.85	99.82	I
I VON 12 BIS < 13 M/S	I 0.16	99.98	I
I VON 13 BIS < 14 M/S	I 0.02	100.00	I
I VON 14 BIS < 15 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 15 BIS < 16 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 16 BIS < 17 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 17 BIS < 18 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 18 BIS < 19 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 19 BIS < 20 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 20 BIS < 21 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 21 BIS < 22 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 22 BIS < 23 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 23 BIS < 24 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 24 BIS < 25 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 25 BIS < 26 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 26 BIS < 27 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 27 BIS < 28 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 28 BIS < 29 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 29 BIS < 30 M/S	I 0.00	100.00	I

I MITTLERE WINDGESCHWINDIGKEIT AN DER STATION :	6.46 M/S	***	ANZAHL DER DATENSATZE :	67625.
I HAEUFIGKEIT DER WINDSTILLEN (V < 0.5 M/S) :	0.00 %	***	ANZAHL DER EINZELDATEN :	67625.

*** ALLE MESSUNGEN UEBER 30 M/S SIND IN DER LETZTEN GRUPPE ENTHALTEN ***

MITTLERE WINDVERHAELTNISSE

STATION : TATING

MESSHOEHE : 12M

ZEITRAUM : 25.10. - 30.10.79

DATENART : 12 SEKUNDEN - MITTELWERTE

I WINDGESCHWINDIGKEIT	I HAEUFIGKEITEN IN Z I			
I	I REL.	CUM.	I	
I VON .5 BIS < 1 M/S	I 0.00	0.00	I	
I VON 1 BIS < 2 M/S	I 0.00	0.00	I	
I VON 2 BIS < 3 M/S	I 0.70	0.70	I	
I VON 3 BIS < 4 M/S	I 7.32	8.02	I	
I VON 4 BIS < 5 M/S	I 15.30	23.32	I	
I VON 5 BIS < 6 M/S	I 20.03	43.34	I	
I VON 6 BIS < 7 M/S	I 19.08	62.42	I	
I VON 7 BIS < 8 M/S	I 16.09	78.51	I	
I VON 8 BIS < 9 M/S	I 12.72	91.23	I	
I VON 9 BIS < 10 M/S	I 6.01	97.24	I	
I VON 10 BIS < 11 M/S	I 2.03	99.27	I	
I VON 11 BIS < 12 M/S	I 0.60	99.87	I	
I VON 12 BIS < 13 M/S	I 0.12	99.99	I	
I VON 13 BIS < 14 M/S	I 0.01	100.00	I	
I VON 14 BIS < 15 M/S	I 0.00	100.00	I	
I VON 15 BIS < 16 M/S	I 0.00	100.00	I	
I VON 16 BIS < 17 M/S	I 0.00	100.00	I	
I VON 17 BIS < 18 M/S	I 0.00	100.00	I	
I VON 18 BIS < 19 M/S	I 0.00	100.00	I	
I VON 19 BIS < 20 M/S	I 0.00	100.00	I	
I VON 20 BIS < 21 M/S	I 0.00	100.00	I	
I VON 21 BIS < 22 M/S	I 0.00	100.00	I	
I VON 22 BIS < 23 M/S	I 0.00	100.00	I	
I VON 23 BIS < 24 M/S	I 0.00	100.00	I	
I VON 24 BIS < 25 M/S	I 0.00	100.00	I	
I VON 25 BIS < 26 M/S	I 0.00	100.00	I	
I VON 26 BIS < 27 M/S	I 0.00	100.00	I	
I VON 27 BIS < 28 M/S	I 0.00	100.00	I	
I VON 28 BIS < 29 M/S	I 0.00	100.00	I	
I VON 29 BIS < 30 M/S	I 0.00	100.00	I	

I MITTLERE WINDGESCHWINDIGKEIT AN DER STATION :	6.46 M/S	***	ANZAHL DER DATENSATZE :	22541. I
I HAEUFIGKEIT DER WINDSTILLEN (V < 0.5 M/S) :	0.00 %	***	ANZAHL DER EINZELDATEN :	22541. I

*** ALLE MESSUNGEN UEBER 30 M/S SIND IN DER LETZTEN GRUPPE ENHALTEN ***

MITTLERE WINDVERHAELTNISSE

STATION : TATING

MESSHOEHE : 12M

ZEITRAUM : 25.10. - 30.10.79

DATENART : 32 SEKUNDEN - MITTELWERTE

I WINDGESCHWINDIGKEIT	I HAEUFIGKEITEN IN Z I		
I	I REL.	CUM.	I
I VON .5 BIS < 1 M/S	I 0.00	0.00	I
I VON 1 BIS < 2 M/S	I 0.00	0.00	I
I VON 2 BIS < 3 M/S	I 0.57	0.57	I
I VON 3 BIS < 4 M/S	I 6.70	7.27	I
I VON 4 BIS < 5 M/S	I 16.34	23.61	I
I VON 5 BIS < 6 M/S	I 19.11	42.72	I
I VON 6 BIS < 7 M/S	I 19.24	61.96	I
I VON 7 BIS < 8 M/S	I 17.05	79.01	I
I VON 8 BIS < 9 M/S	I 13.15	92.15	I
I VON 9 BIS < 10 M/S	I 5.64	97.80	I
I VON 10 BIS < 11 M/S	I 1.77	99.57	I
I VON 11 BIS < 12 M/S	I 0.34	99.92	I
I VON 12 BIS < 13 M/S	I 0.08	100.00	I
I VON 13 BIS < 14 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 14 BIS < 15 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 15 BIS < 16 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 16 BIS < 17 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 17 BIS < 18 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 18 BIS < 19 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 19 BIS < 20 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 20 BIS < 21 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 21 BIS < 22 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 22 BIS < 23 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 23 BIS < 24 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 24 BIS < 25 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 25 BIS < 26 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 26 BIS < 27 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 27 BIS < 28 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 28 BIS < 29 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 29 BIS < 30 M/S	I 0.00	100.00	I

I MITTLERE WINDGESCHWINDIGKEIT AN DER STATION :	6.46 M/S	***	ANZAHL DER DATENSAETZE :	8451. I
I HAEUFIGKEIT DER WINDSTILLEN (V < 0.5 M/S) :	0.00 %	***	ANZAHL DER EINZELDATEN :	8451. I

*** ALLE MESSUNGEN UEBER 30 M/S SIND IN DER LETZTEN GRUPPE ENTHALTEN ***

M I T T L E R E W I N D V E R H A E L T N I S S E

S T A T I O N : T A T I N G

M E S S H O E H E : 12 M

Z E I T R A U M : 25.10. - 30.10.79

D A T E N A R T : 1 M I N U T E N - M I T T E L W E R T E

I WINDGESCHWINDIGKEIT I	I HAEUFIGKEITEN IN % I		
	I REL.	CUM.	I
I VON .5 BIS < 1 M/S	I 0.00	0.00	I
I VON 1 BIS < 2 M/S	I 0.00	0.00	I
I VON 2 BIS < 3 M/S	I 0.38	0.38	I
I VON 3 BIS < 4 M/S	I 6.72	7.10	I
I VON 4 BIS < 5 M/S	I 16.35	23.45	I
I VON 5 BIS < 6 M/S	I 18.84	42.29	I
I VON 6 BIS < 7 M/S	I 19.28	61.57	I
I VON 7 BIS < 8 M/S	I 17.22	78.79	I
I VON 8 BIS < 9 M/S	I 13.58	92.37	I
I VON 9 BIS < 10 M/S	I 5.84	98.20	I
I VON 10 BIS < 11 M/S	I 1.51	99.71	I
I VON 11 BIS < 12 M/S	I 0.22	99.93	I
I VON 12 BIS < 13 M/S	I 0.07	100.00	I
I VON 13 BIS < 14 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 14 BIS < 15 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 15 BIS < 16 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 16 BIS < 17 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 17 BIS < 18 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 18 BIS < 19 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 19 BIS < 20 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 20 BIS < 21 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 21 BIS < 22 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 22 BIS < 23 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 23 BIS < 24 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 24 BIS < 25 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 25 BIS < 26 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 26 BIS < 27 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 27 BIS < 28 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 28 BIS < 29 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 29 BIS < 30 M/S	I 0.00	100.00	I

I MITTLERE WINDGESCHWINDIGKEIT AN DER STATION :	6.46 M/S	***	ANZAHL DER DATENSATZE :	4507.
I HAEUFIGKEIT DER WINDSTILLEN (V < 0.5 M/S) :	0.00 %	***	ANZAHL DER EINZELDATEN :	4507.

*** ALLE MESSUNGEN UEBER 30 M/S SIND IN DER LETZTEN GRUPPE ENHALTEN ***

MITTLERE WINDVERHAELTNISSE

STATION : TATING

MESSHOEHE : 12M

ZEITRAUM : 25.10. - 30.10.79

DATENART : 2 MINUTEN - MITTELWERTE

I WINDGESCHWINDIGKEIT I	I HAEUFIGKEITEN IN % I	
	I REL.	CUM. I
I VON .5 BIS < 1 M/S I	0.00	0.00 I
I VON 1 BIS < 2 M/S I	0.00	0.00 I
I VON 2 BIS < 3 M/S I	0.31	0.31 I
I VON 3 BIS < 4 M/S I	5.95	6.26 I
I VON 4 BIS < 5 M/S I	17.10	23.36 I
I VON 5 BIS < 6 M/S I	19.27	42.63 I
I VON 6 BIS < 7 M/S I	18.56	61.19 I
I VON 7 BIS < 8 M/S I	17.01	78.20 I
I VON 8 BIS < 9 M/S I	14.88	93.07 I
I VON 9 BIS < 10 M/S I	5.46	98.53 I
I VON 10 BIS < 11 M/S I	1.24	99.78 I
I VON 11 BIS < 12 M/S I	0.22	100.00 I
I VON 12 BIS < 13 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 13 BIS < 14 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 14 BIS < 15 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 15 BIS < 16 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 16 BIS < 17 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 17 BIS < 18 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 18 BIS < 19 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 19 BIS < 20 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 20 BIS < 21 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 21 BIS < 22 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 22 BIS < 23 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 23 BIS < 24 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 24 BIS < 25 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 25 BIS < 26 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 26 BIS < 27 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 27 BIS < 28 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 28 BIS < 29 M/S I	0.00	100.00 I
I VON 29 BIS < 30 M/S I	0.00	100.00 I

I-----I				
I MITTLERE WINDGESCHWINDIGKEIT AN DER STATION :	6.46 M/S	***	ANZAHL DER DATENSATZE :	2252. I
I HAEUFIGKEIT DER WINDSTILLEN (V < 0.5 M/S) :	0.00 %	***	ANZAHL DER EINZELDATEN :	2252. I
I-----I				

*** ALLE MESSUNGEN UEBER 30 M/S SIND IN DER LETZTEN GRUPPE ENTHALTEN ***

MITTLERE WINDVERHAELTNISSE

STATION : TATING

MESSHOEHE : 12M

ZEITRAUM : 25.10. - 30.10.79

DATENART : 10 MINUTEN - MITTELWERTE

I WINDGESCHWINDIGKEIT	I HAEUFIGKEITEN IN Z I		
I	I REL. CUM. I		
I VON .5 BIS < 1 M/S	I 0.00 0.00 I		
I VON 1 BIS < 2 M/S	I 0.00 0.00 I		
I VON 2 BIS < 3 M/S	I 0.22 0.22 I		
I VON 3 BIS < 4 M/S	I 5.36 5.58 I		
I VON 4 BIS < 5 M/S	I 18.08 23.66 I		
I VON 5 BIS < 6 M/S	I 18.08 41.74 I		
I VON 6 BIS < 7 M/S	I 18.53 60.27 I		
I VON 7 BIS < 8 M/S	I 18.30 78.57 I		
I VON 8 BIS < 9 M/S	I 14.29 92.86 I		
I VON 9 BIS < 10 M/S	I 6.47 99.33 I		
I VON 10 BIS < 11 M/S	I 0.67 100.00 I		
I VON 11 BIS < 12 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 12 BIS < 13 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 13 BIS < 14 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 14 BIS < 15 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 15 BIS < 16 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 16 BIS < 17 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 17 BIS < 18 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 18 BIS < 19 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 19 BIS < 20 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 20 BIS < 21 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 21 BIS < 22 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 22 BIS < 23 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 23 BIS < 24 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 24 BIS < 25 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 25 BIS < 26 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 26 BIS < 27 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 27 BIS < 28 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 28 BIS < 29 M/S	I 0.00 100.00 I		
I VON 29 BIS < 30 M/S	I 0.00 100.00 I		

I MITTLERE WINDGESCHWINDIGKEIT AN DER STATION :	6.45 M/S	##	ANZAHL DER DATENSATZE :	448. I
I HAEUFIGKEIT DER WINDBILLEN (V < 0.5 M/S) :	0.00 Z	##	ANZAHL DER EINZELDATEN :	448. I

ALLE MESSUNGEN UEBER 30 M/S SIND IN DER LETZTEN GRUPPE ENTHALTEN

MITTLERE WINDVERHAELTNISSE

STATION : TATING

MESSHOEHE : 12M

ZEITRAUM : 25.10. - 30.10.79

DATENART : 30 MINUTEN - MITTELWERTE

I WINDGESCHWINDIGKEIT I	I HAEUFIGKEITEN IN % I		
	I REL.	CUM.	I
I VON .5 BIS < 1 M/S	I 0.00	0.00	I
I VON 1 BIS < 2 M/S	I 0.00	0.00	I
I VON 2 BIS < 3 M/S	I 0.00	0.00	I
I VON 3 BIS < 4 M/S	I 5.44	5.44	I
I VON 4 BIS < 5 M/S	I 17.69	23.13	I
I VON 5 BIS < 6 M/S	I 19.73	42.86	I
I VON 6 BIS < 7 M/S	I 16.33	59.18	I
I VON 7 BIS < 8 M/S	I 22.45	81.63	I
I VON 8 BIS < 9 M/S	I 12.93	94.56	I
I VON 9 BIS < 10 M/S	I 4.76	99.32	I
I VON 10 BIS < 11 M/S	I 0.68	100.00	I
I VON 11 BIS < 12 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 12 BIS < 13 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 13 BIS < 14 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 14 BIS < 15 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 15 BIS < 16 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 16 BIS < 17 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 17 BIS < 18 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 18 BIS < 19 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 19 BIS < 20 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 20 BIS < 21 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 21 BIS < 22 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 22 BIS < 23 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 23 BIS < 24 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 24 BIS < 25 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 25 BIS < 26 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 26 BIS < 27 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 27 BIS < 28 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 28 BIS < 29 M/S	I 0.00	100.00	I
I VON 29 BIS < 30 M/S	I 0.00	100.00	I

I MITTLERE WINDGESCHWINDIGKEIT AN DER STATION :	6.44 M/S	***	ANZAHL DER DATENSATZE :	147. I
I HAEUFIGKEIT DER WINDSTILLEN (V < 0.5 M/S) :	0.00 %	***	ANZAHL DER EINZELDATEN :	147. I

*** ALLE MESSUNGEN UEBER 30 M/S SIND IN DER LETZTEN GRUPPE ENTHALTEN ***

MITTLERE WINDVERHAELTNISSE

STATION : TATING

MESSHOEHE : 12M

ZEITRAUM : 25.10. - 30.10.79

DATENART : 1 STUNDEN - MITTELWERTE

I WINDGESCHWINDIGKEIT I	I HAEUFIGKEITEN IN % I		
	I REL.	I CUM.	I
I VON .5 BIS < 1 M/S	I 0.00	I 0.00	I
I VON 1 BIS < 2 M/S	I 0.00	I 0.00	I
I VON 2 BIS < 3 M/S	I 0.00	I 0.00	I
I VON 3 BIS < 4 M/S	I 2.78	I 2.78	I
I VON 4 BIS < 5 M/S	I 20.83	I 23.61	I
I VON 5 BIS < 6 M/S	I 18.06	I 41.67	I
I VON 6 BIS < 7 M/S	I 20.83	I 62.50	I
I VON 7 BIS < 8 M/S	I 19.44	I 81.94	I
I VON 8 BIS < 9 M/S	I 12.50	I 94.44	I
I VON 9 BIS < 10 M/S	I 5.56	I 100.00	I
I VON 10 BIS < 11 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 11 BIS < 12 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 12 BIS < 13 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 13 BIS < 14 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 14 BIS < 15 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 15 BIS < 16 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 16 BIS < 17 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 17 BIS < 18 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 18 BIS < 19 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 19 BIS < 20 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 20 BIS < 21 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 21 BIS < 22 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 22 BIS < 23 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 23 BIS < 24 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 24 BIS < 25 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 25 BIS < 26 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 26 BIS < 27 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 27 BIS < 28 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 28 BIS < 29 M/S	I 0.00	I 100.00	I
I VON 29 BIS < 30 M/S	I 0.00	I 100.00	I

I MITTLERE WINDGESCHWINDIGKEIT AN DER STATION :	6.44 M/S	***	ANZAHL DER DATENSATZE :	72. I
I HAEUFIGKEIT DER WINDSTILLEN (V < 0.5 M/S) :	0.00 %	***	ANZAHL DER EINZELDATEN :	72. I

*** ALLE MESSUNGEN UEBER 30 M/S SIND IN DER LETZTEN GRUPPE ENTHALTEN ***

DATENARI: 4 SEKUNDEN - MITTELWERTE
 MESSORT: TATING
 ZEITRAUM: 25.10. - 30.10.79
 HOEHE (M): 12

[illegible]

中国农村出版社

NOENE (H) 26

3

DATEIART: 4 SEKUNDEN - MITTELWERTE
HEBBORT: TATUNG
ZEITRAUM: 25.10. - 30.10.79
NACH: H/148

180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

Die Variabilität des Windvektors bis 200 m Höhe
an der deutschen Küste im Hinblick auf die Windkraftnutzung

G. Duensing, H. Schmidt, Deutscher Wetterdienst

1. Einführung

Die Unterlagen zu diesem Vortrag wurden uns freundlicherweise von den Herren Dr. Peters und Dr. Wamser vom Meteorologischen Institut der Universität Hamburg zur Verfügung gestellt, denen wir hiermit unseren Dank aussprechen. Es sind interessante meteorologische Situationen dabei, die sie in ihrer speziellen Forschungsarbeit, z.T. zufällig, gesammelt haben. Es kann nicht die Aufgabe eines Hochschulinstitutes sein, über die Erforschung der Prinzipien und grundlegenden Eigenschaften der Atmosphäre hinaus eine systematische Sammlung von Daten im Hinblick auf Klimastatistiken zu betreiben.

Im Rahmen dieses Projektes beabsichtigt der Deutsche Wetterdienst daher, ein SODAR-Gerät zur indirekten Messung des Windes bis ca. 300 m Höhe anzuschaffen. Die Funktionsweise, Geräteeigenschaften und Möglichkeiten der Messung zu unterschiedlichen meteorologischen Fragestellungen werden hier kurz beschrieben. Eine interessante neue Erweiterungsmöglichkeit wird am Schluß beschrieben.

2. Technische Beschreibung

Das Wort SODAR ist analog zu RADAR gebildet und bedeutet "Sound detecting and ranging". Das Funktionsprinzip beruht darauf, daß Schallwellen an den stets in der Atmosphäre vorhandenen kleinskaligen Dichteinhomogenität (Turbulenzelementen) zurückgestreut werden. Es ist dazu notwendig, einen kurzen, gebündelten (gerichteten) Schallimpuls einer definierten Frequenz in die Atmosphäre abzusenden. Die zeitliche Abfolge der Echos ergibt die Höhenzuordnung der zugehörigen Rückstreuolumina über die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles.

Die Echos aus jeder Höhenstufe werden von einem Signalverarbeitungssystem (meist Prozessrechner) auf ihre Intensität und Frequenzcharakteristik hin untersucht. Hier unterscheiden sich die verschiedenen Systeme. Eine Frequenzuntersuchung der Echos ist notwendig, da moderne SODAR-Geräte nach dem Doppler-Prinzip zur Bestimmung von Geschwindigkeiten arbeiten. Es wird dabei angenommen, daß die rückstreuenden Luftvolumina keine Eigenbewegungen vollführen, sondern gewissermaßen in der dreidimensionalen Luftbewegung (dem Wind) "mitschwimmen". Darum ist die Dopplerverschiebung der ausgestrahlten Frequenz im Echo ein direktes Maß für die Komponente des Windes in der Richtung des ausgesendeten Schallstrahles (gemessen wird also die Radialkomponente des Windes).

Die Intensität des rückgestreuten Echos ist dabei um mehrere Größenordnungen kleiner als die des ausgesendeten Impulses. Sie kann unter ungünstigen Rückstreubedingungen im Rauschen (Umgebungsgeräusch) liegen, was besondere Maßnahmen bei der Signalerkennung erforderlich macht. Auch hier unterscheiden sich die verschiedenen Systeme.

Niederschlag in jeder Form (außer vielleicht Nieselregen) macht eine SODAR-Messung unbrauchbar. Diese nahezu einzige Betriebseinschränkung darf keinesfalls außer acht gelassen werden.

Typischerweise besteht ein SODAR aus drei Antennensystemen, deren eines vertikal, die beiden anderen $20-30^\circ$ gegen Azimuth geneigt sind und in der Horizontalen um 90° versetzt angeordnet sind (Bild 1 und 2). Dabei sind grundsätzlich verschiedene Betriebsarten zu unterscheiden:

a) Die multistatische Betriebsart

Die drei (oder auch 4) Antennen stehen etwa 100 m voneinander entfernt (in der erwähnten Ausrichtung und sind so angeordnet, daß sie in ein gemeinsames, in ca. 100 m Höhe zentriertes Volumen "hineinblicken" (Abb. 2 unten). Da der Schallstrahl nicht ideal scharf gebündelt ist, kann unter Zuhilfenahme der Laufzeit ein Vertikalbereich zwischen etwa 50 und 150 m Höhe in engen Höhenstufen ausgetastet werden.

Dabei fungiert eine Antenne (vorzugsweise die vertikale) als Sender und alle (auch diese) als Empfänger. So können die Vertikalkomponente des Windes und zwei Radialkomponenten im Takt von 1-2 Sekunden gemessen werden. Die Radialkomponenten können, weil der Vertikalwind bekannt ist (im gleichen Rückstreuervolumen), in die horizontalen Windkomponenten umgerechnet werden. Damit liegt der vollständige 3-dimensionale

Windvektor in kurzen Zeit- und Höhenintervallen genau in dem Bereich vor, in dem große Windkraftanlagen arbeiten.

Damit können fast alle atmosphärischen Ereignisse, die für den Betrieb großer Windkraftanlagen von Bedeutung sind, erfaßt werden, insbesondere Scherwindsituationen und Turbulenzspektren. Ein Beispiel eines Horizontalwindspektrums zeigt Abb. 3, das im Rahmen des Projektes ET 1413 A an einem Mast 28 m oberhalb einer 30 m hohen Düne aufgezeichnet wurde. Es wurde aus einer siebenstündigen Serie von 1 Sekunden-Mittelwerten für einen leicht konvektiven Nordwestwindfall berechnet. Dem Bereich der Mikroturbulenz wurde ein theoretisches Spektrum angepaßt (glatte Kurve).

Der Nachteil dieser Betriebsart ist der fehlende Anschluß an die Windverhältnisse in 10 m Höhe, dem aber ein zusätzlicher Mast, etwa 20 m hoch, bestückt mit Anemometern abhelfen könnte. Eine Erweiterung des Höhenbereiches ist auch durch periodisch schwenkende Antennen denkbar, doch eine derartige Technik ist noch nicht ausgereift.

b) Die monostatische Betriebsart

Hier stehen die Antennen nahe beieinander (Bild 1 und Bild 2 oben) und "blicken" alle in verschiedene Richtungen. D.h. die Rückstreuolumina der drei Antennen sind räumlich von einander getrennt, und zwar umso weiter, je höher sie sich befinden. Das hat den Nachteil, daß die Vertikalkomponente des Windes nicht am gleichen Ort gemessen wird wie die (horizontal/vertikal gemischten) Radikalkomponenten der zwei geneigten Antennen.

Da hilft nur eine langzeitige Mittelung, denn die Vertikalkomponente W des Windes schwankt um einen Mittelwert Null, wenn über ebenem Gelände gemessen wird. Bei annähernd neutraler Schichtung der Atmosphäre mögen zur Elimination des Vertikalwindes gut 2 Minuten Mittelung ausreichen. Bei stabiler Schichtung können sich dagegen Schwerewellen, im labilen Fall Konvektionszellen ausbilden, deren länger andauernder Vertikalwind auch eine längere Mittelung, im Extremfall bis 30 Min. erfordert. Im allgemeinen sind zehn Minuten ausreichend.

Der Vorteil der monostatischen Anordnung liegt darin, daß mit einfachem Meßaufbau das gesamte mittlere Windprofil praktisch vom Boden bis zur größten erreichbaren Höhe kontinuierlich erfaßt werden kann.

Und zwar ergibt sich der vollständige Horizontalwindvektor in allen Höhen, da die beiden gegen die Vertikale geneigten Antennen in der Horizontalen nochmals gegeneinander gedreht sind und so sich zwei verschiedene Windkomponenten ergeben, die zusammen den ganzen Windvektor beschreiben. Der Vertikalwind ergibt sich sogar in Abständen von 1 bis 4 Sekunden, so daß zusätzlich die Bestimmung der Vertikalwindvarianz (einer wichtigen Größe in Ausbreitungsangelegenheiten) möglich ist.

c) Andere Betriebsarten

Für speziellere Anwendungen sind eine Reihe weiterer Betriebsarten mit veränderter Antennenanordnung möglich. Als Beispiel seien genannt:

- Einsatz schwenkbarer Antennen zum Ausmessen von Abgasfahnen über die erhöhte Rückstreuintensität als Beispiel für den Einsatz in Ausbreitungsuntersuchungen.
- Linienförmige Anordnung von Antennen mit parallel gerichteten Schallstrahlen unterschiedlicher Frequenz zur Ausmessung lateraler Kohärenz atmosphärischer Vorgänge. Dabei können die Antennen vertikal bis (fast) horizontal gerichtet sein. Eine derartige Anordnung ist zur ansatzweisen Bestimmung der lateralen Variabilität der Longitudinalwindkomponente denkbar, die zur Dimensionierung von Windkraftanlagen erforderlich ist.
- Variable Antennenstellung zur Vermessung von Dimension, Geschwindigkeit und Lebensdauer von Heckschleppenturbulenz auf Großflughäfen. Die hohen Geschwindigkeiten erfordern hier eine erweiterte Auslegung der elektronischen Einrichtungen.

3. Meßbeispiele

Insgesamt ist festzustellen, daß ein SODAR-Gerät bei ausreichender technischer Ausstattung eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten erlaubt, die viele im Zusammenhang mit der Nutzung der Windkraft auftretende Fragen am Ort zu untersuchen gestattet. Ein paar Meßbeispiele mögen dies verdeutlichen.

Immer noch aktuell ist die Frage der Extrapolation des Windes in 10 m Höhe in größere Höhen. Bei hohen Bodenwindgeschwindigkeiten ist eine genäherte Umrechnung mittels eines logarithmischen Windprofils möglich, da sich hier eine ungefähr neutrale Dichteschichtung einstellt. Anders bei geringem

Bodenwind; hier ist der Schluß auf geringen Höhenwind u.U. völlig falsch. Bild 4 zeigt einen solchen Fall. Hier baut sich in der Nacht zwischen der Bodeninversion und einer freien Inversion in 140 m Höhe eine dünne Schicht mit 14 m/s Windgeschwindigkeit (immerhin Windstärke 7) auf, während am Boden weiterhin Windstille herrscht! Eine Statistik solcher "low level jet"-Ereignisse wäre wünschenswert.

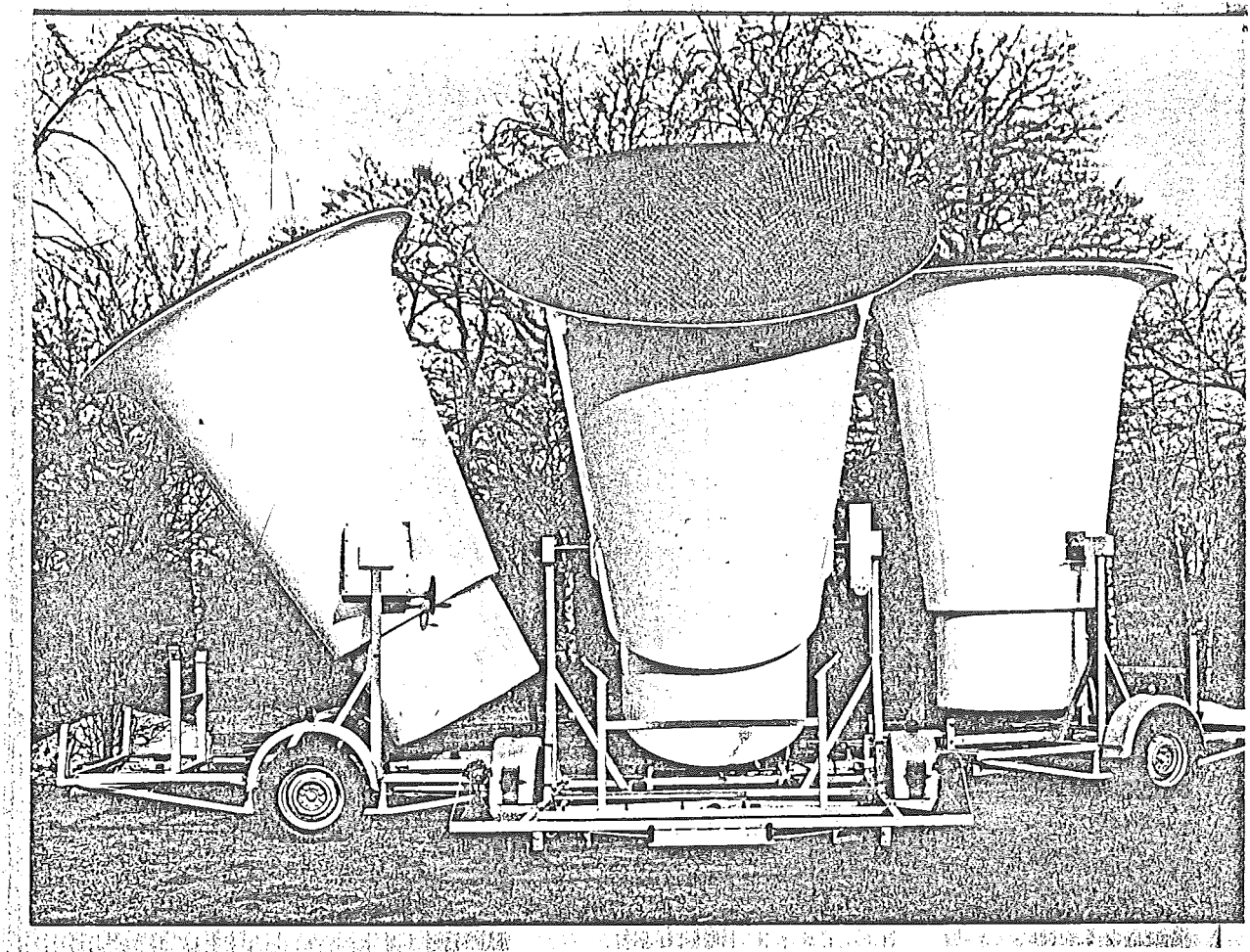
Freie Inversionen wirken in der Atmosphäre gewissermaßen wie interne Gleitflächen. Oberhalb und unterhalb der Inversion kann der Wind mit unterschiedlicher Richtung und Stärke wehen. Ein solcher Fall starker Windscherung im Wirkungsbereich eines Windkraftwerkes könnte den Betrieb empfindlich stören.

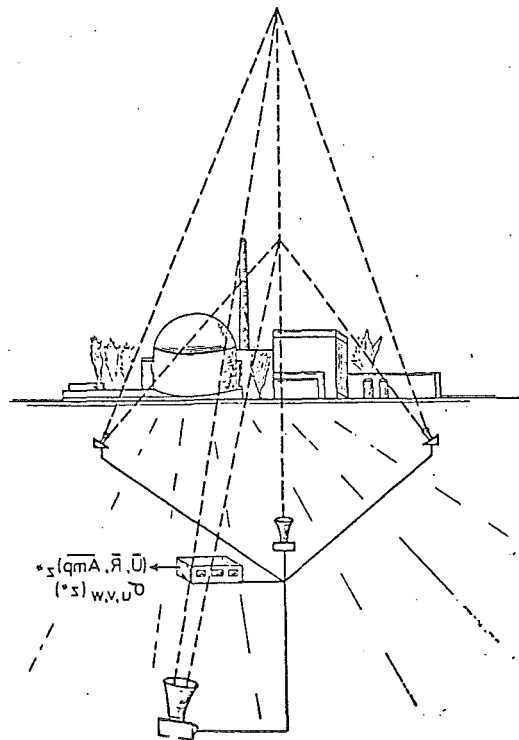
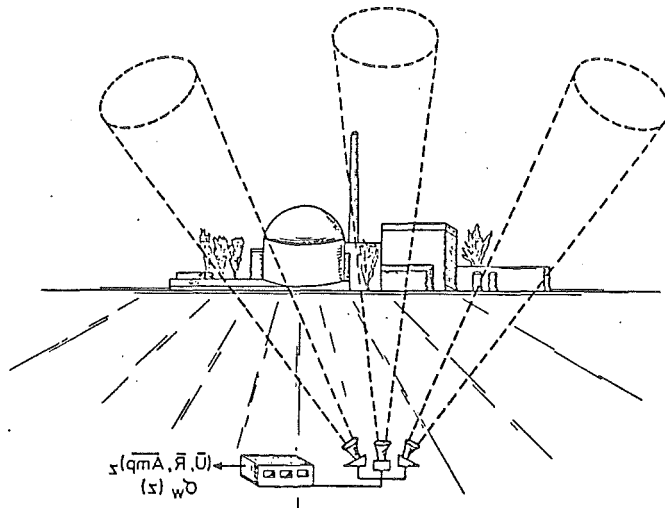
Ein weiteres Meßbeispiel (Abb. 5) zeigt einen Vergleich mit einer unabhängigen Windmessung mit einem Schalenkreuzanemometer. Die Messungen (oben) stimmen auf etwa ± 1 m/s überein, wobei man die Unsicherheit durchaus nicht nur dem SODAR zuschreiben darf. Außerdem gibt das SODAR noch ein detailliertes Windprofil (rechts).

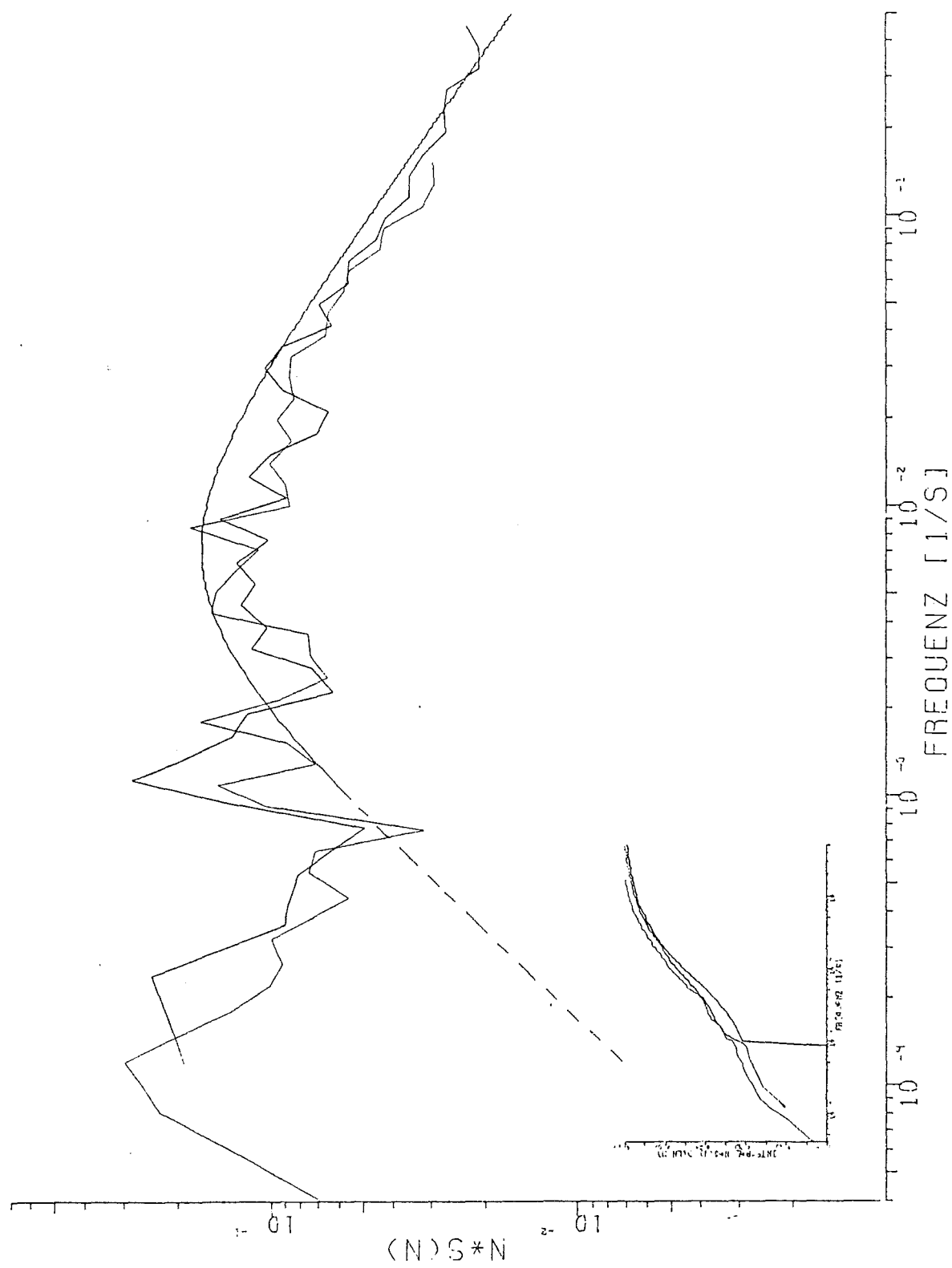
Im Vortrag werden weitere Meßbeispiele dargestellt, die hier aus Platzgründen nicht gegeben werden, sie betreffen interne Schwerewellen und konvektive Vorgänge.

4. Eine interessante Erweiterungsmöglichkeit zum RASS-System

RASS soll heißen Radio-akustisches Sondierungs-System. Es befindet sich allerdings noch in der Entwicklung und gestattet die indirekte Bestimmung vertikaler Temperaturprofile (zusätzlich zum Wind). Das Meßprinzip funktioniert folgendermaßen: Der Schallimpuls des SODAR erzeugt selbst Dichteinhomogenitäten (Schallfronten) definierter Wellenlänge in der Atmosphäre. Ein zusätzlich in irgendeine Stelle des Schallstrahles gesendete elektromagnetische Welle der doppelten Wellenlänge erfährt hier eine Rückstreuung am Gitter der Schallfronten. Da nun die Schallwellen sich mit der Schallgeschwindigkeit fortpflanzen und diese der Temperatur in der jeweiligen Höhe proportional ist, ist auch die Dopplerverschiebung des rückgestreuten elektromagnetischen Signales der Temperatur direkt proportional. Für eine routinemäßige Anwendung des RASS-Systems sind noch technische Schwierigkeiten zu überwinden. Der Vergleich mit unabhängigen Temperatursensoren (Abb. 6) zeigt aber die hoffnungserweckende prinzipielle Brauchbarkeit dieses indirekten Meßverfahrens.

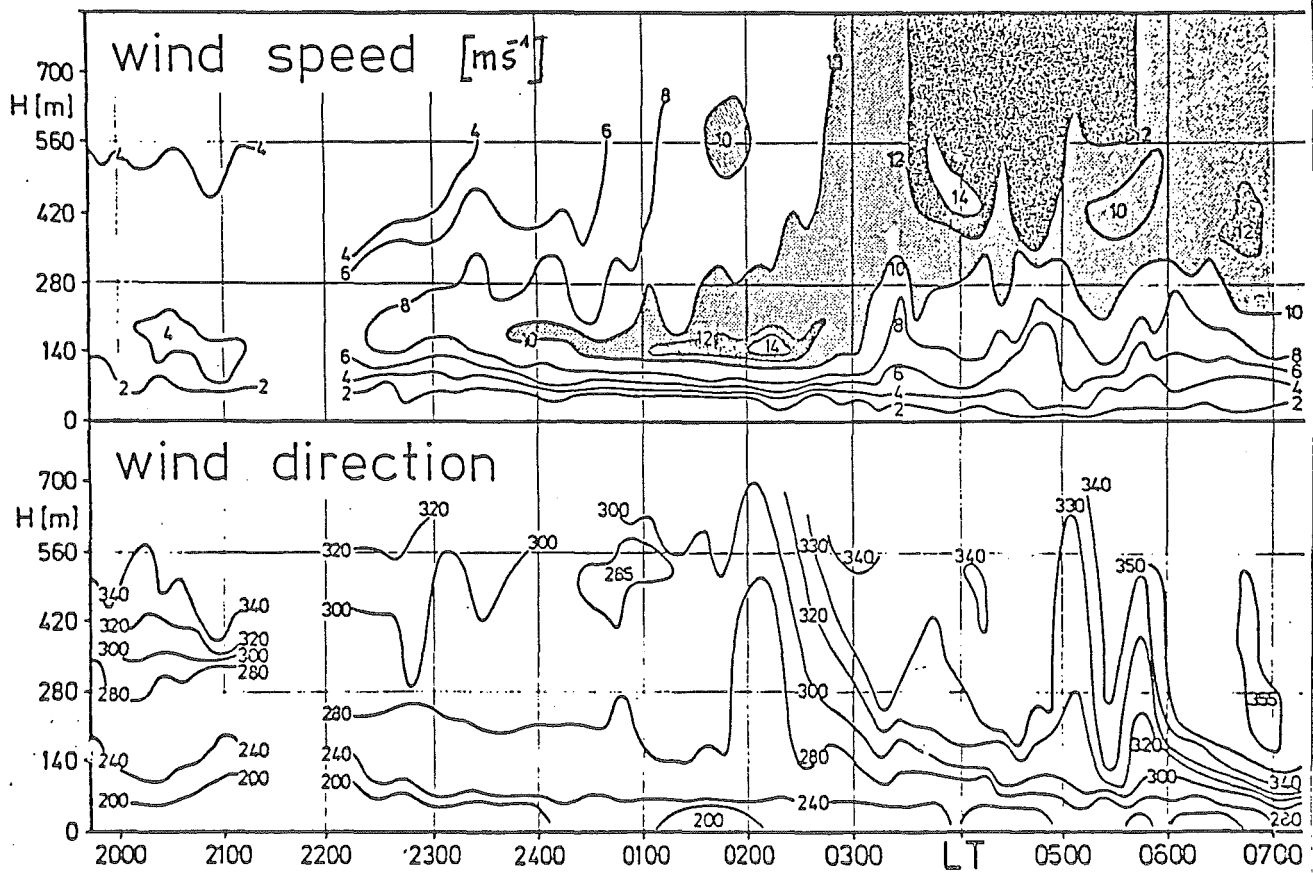
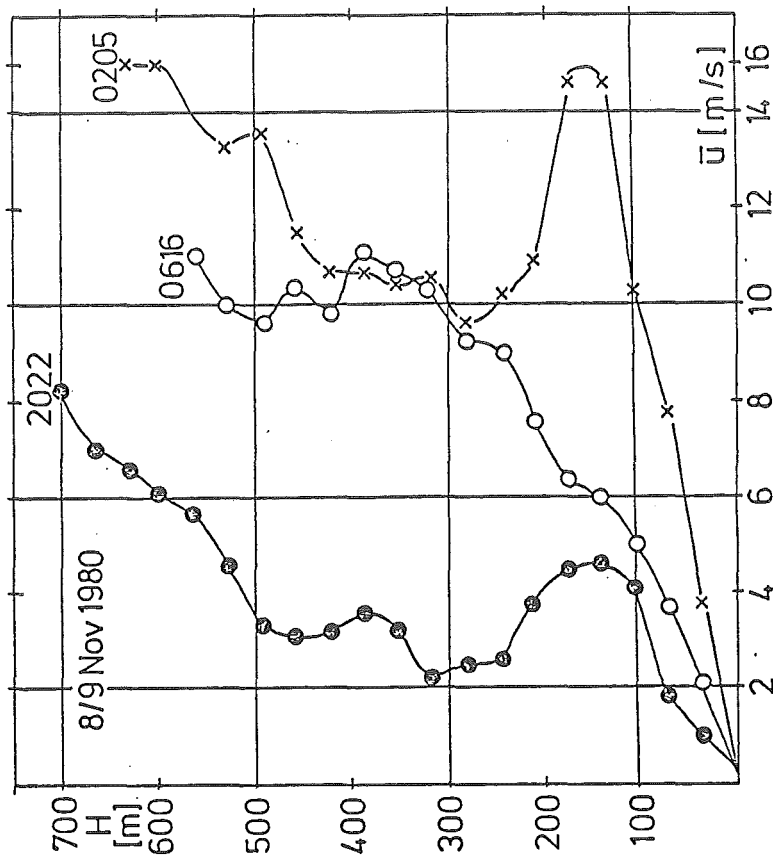


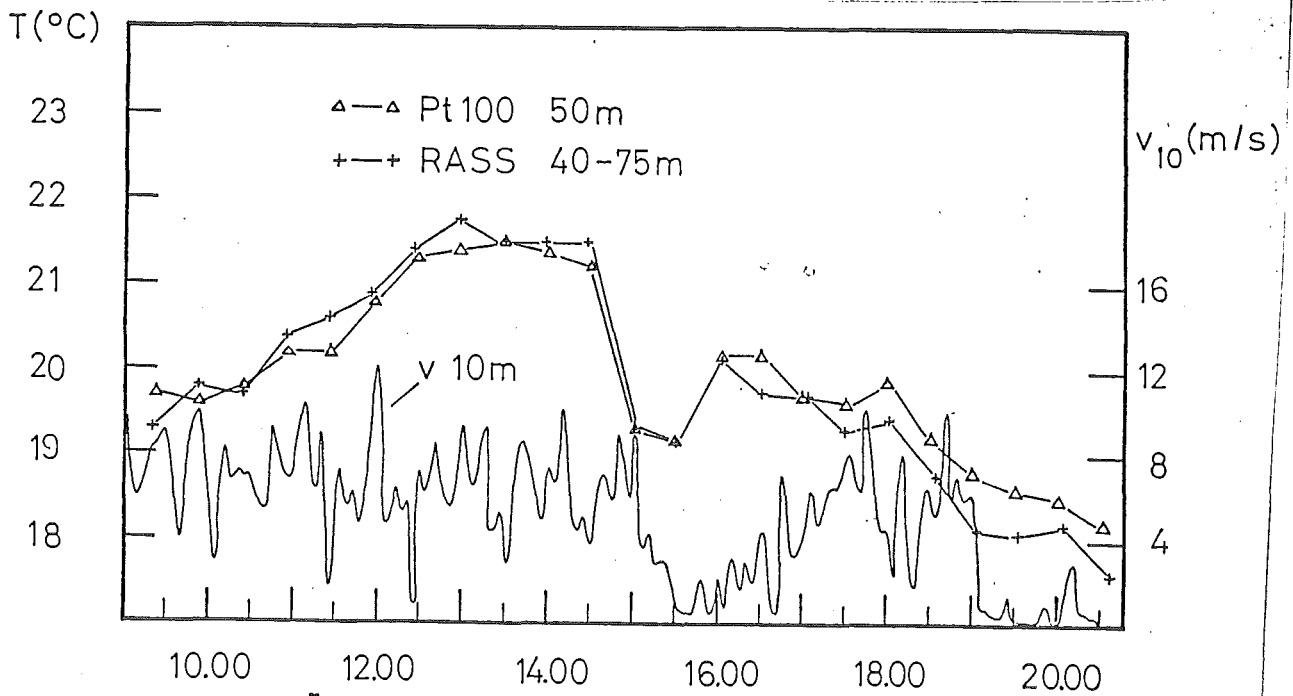
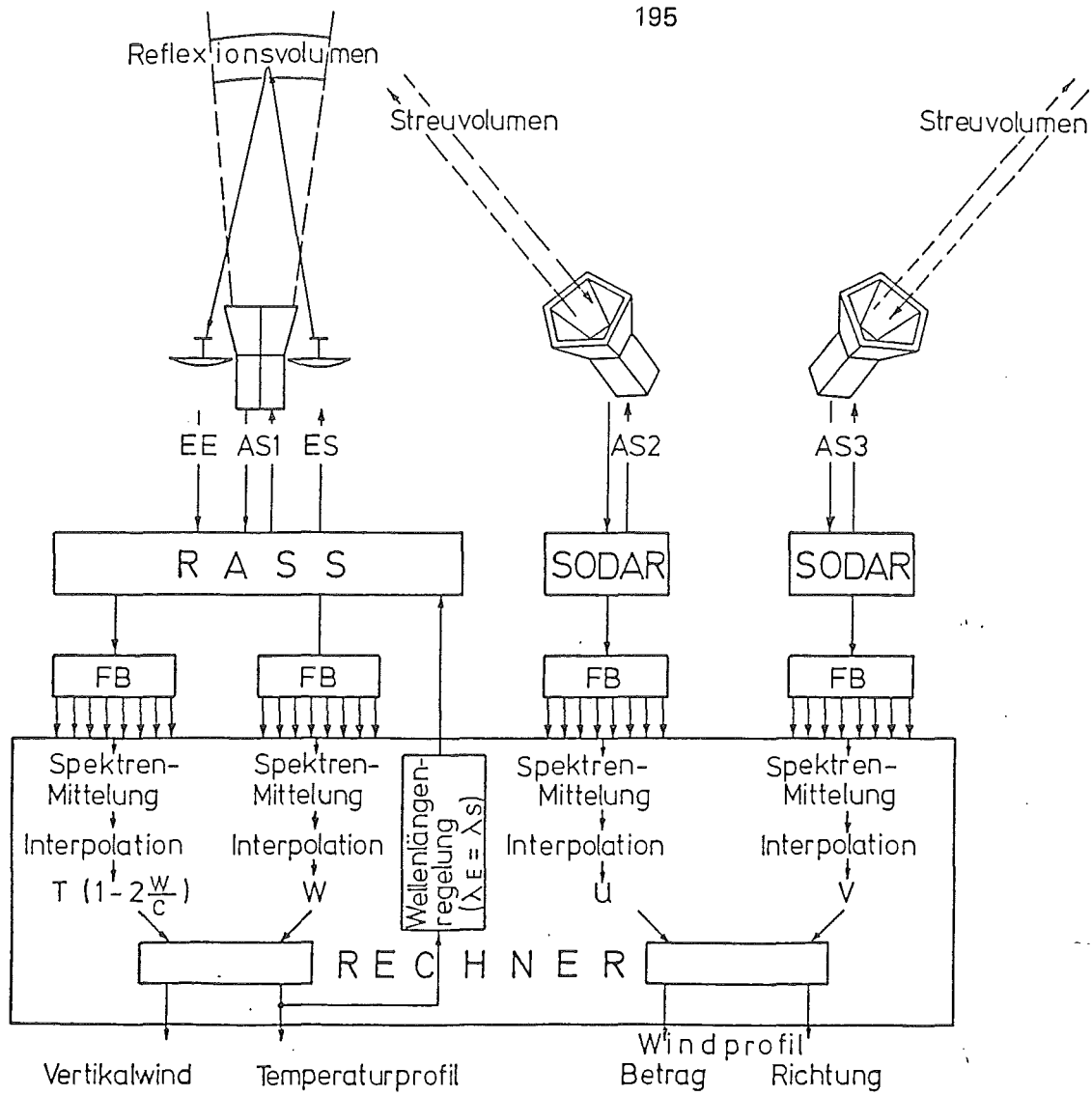




1 KANAL 1 GR. ANTENNE 28 M

Abb. 6





3.8.78 Hamburg Billwerder

Windmessungen in großer Höhe

G. Tetzlaff, S. Theunert, Universität Hannover

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
1. Einleitung.	1
2. Der 150 m - Mast.	2
3. Vorläufige Ergebnisse.	4
4. Verwendung von Mastmeßwerten als Kalibra- tionspunkte für die Ergebnisse eines mathe- matisch-numerischen Grenzschichtmodells.	5
4.1 Das verwendete Modell.	5
4.2 Die notwendigen Anfangsdaten.	8
4.3 Klimatologisch repräsentative Ergebnisse von Modellläufen.	10
5. Der Wind im Küstenvorfeld, ein Vergleich von numerisch berechneten und gemessenen Werten.	13
5.1 Vorbemerkungen.	13
5.2 Statistische Auswertung von Windmessungen im Küstenvorfeld.	14
5.3 Darstellung der Auswahlkriterien.	16
5.4 Darstellung der Ergebnisse.	18
5.5 Initialisierung der Modellläufe.	19
6. Schlußbemerkung.	22
7. Literaturverzeichnis.	23
8. Verzeichnis der Abbildungen.	26
9. Verzeichnis der Tabellen.	40

1. Einleitung.

Für den optimalen Einsatz von großen Windkraftanlagen, hierbei handelt es sich um die Anlage GROWIAN, ist eine Fülle von Informationen über das Windfeld erforderlich. Das gilt insbesondere, weil die typischen Höhen von großen Anlagen zwischen 30 m und 250 m Höhe über Grund liegen, GROWIAN zwischen 50 m und 150 m Höhe. Dabei ist es nicht nur von Interesse, das Windenergiepotential eines Standortes, hier des GROWIAN-Standortes zu erkunden, sondern auch Angaben über Lastfälle zu erhalten.

2. Der 150 m - Mast.

Um im Vorlauf vor der Errichtung von GROWIAN selbst Informationen über das Windfeld zu sammeln, erfolgte die Errichtung eines meteorologischen Meßmastes in 150 m Höhe. Der Mast ist eine abgespannte Dreiecksgitterkonstruktion aus Winkelprofilstahl aufgebaut. Er ist in 4 Höhen abgespannt. Die Seitenlänge des Mastes beträgt 1.50 m, so daß die Ausleger die doppelte Länge haben. Am Mast wird seit dem Oktober 1980 gemessen. Die Meßgeräte sind in vier Niveaus, 10 m, 50 m, 100 m und 150 m über Grund angebracht (Abb. 1.1). In den Höhen 50 m und 100 m sind im Winkelabstand von 120° jeweils drei Ausleger von 3 m Länge montiert, an deren Spitze sich die Meßfühler für Windrichtung und Windgeschwindigkeit befinden. In 10 m Höhe wird nur die Windgeschwindigkeit gemessen, in 150 m Höhe wird an einer Stange oberhalb einer Arbeitsplattform an einem Meßfühler die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit gemessen. Die Lufttemperatur wird in allen 4 Höhen jeweils an einem Meßfühler erfaßt.

Zur Messung der Windgeschwindigkeit dienen beheizte Schalensternanemometer, die mit einem Generator ausgestattet sind. Der Meßbereich für die erfaßten 2-Minuten-Mittelwerte beträgt 41 ms^{-1} . Der Temperaturmeßbereich beträgt -10°C bis 50°C . Die Datenaufzeichnung erfolgt auf eine Magnetkassette, die etwa einmal pro Woche zu wechseln ist.

Es werden 2-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit aufgezeichnet. Die Lufttemperatur wird alle 2 Minuten momentan abgetastet, die Windrichtung ebenfalls. Die

Entscheidung, welcher der Meßfühler in die weitere Auswertung eingeht, wird aus der Windrichtung getroffen. Nach den vorliegenden Ergebnissen ist der jeweilige Sektor, in die der Ausleger weist, mit dem geringsten Störeinfluß durch den Mast versehen. Aus einigen der Ergebnisse geht hervor, daß die Strömung an der Mastspitze vermutlich nicht den geforderten ungestörten Bedingungen entspricht. Es wird empfohlen, zumindest den Windgeschwindigkeitsfühler auf ein Rohrstück von etwa 3 m Länge zu setzen, so daß er die freie Strömung erfassen kann.

Die Messung von Schwankungen der Windgeschwindigkeit, für 1 - 5 - Sekunden-Mittelwerte erfolgt seit März 1981 mit einer veränderten Ausstattung der Datenerfassungseinheit. Es werden die gleichen Anemometer verwendet, so daß wegen deren Trägheit die genannten Mittelungsintervalle nicht unterschritten werden sollten (Coppin, 1980).

3. Vorläufige Ergebnisse.

Die Messungen am 150 m hohen Turm wurden in einer statistischen Form ausgewertet. Die Häufigkeitsverteilung wurde in 1 ms^{-1} breiten Klassen dargestellt und jeweils für alle 8 Hauptwindrichtungen getrennt ermittelt (Tab. 3.1). Die Aufteilung auf die drei vorgegebenen Windgeschwindigkeitsklassen ist auf die Anwendung bei der Nutzung der Windenergie ausgelegt. Die Tabelle 3.1 a - d zeigt die Windgeschwindigkeitszunahme mit der Höhe, wobei von 100 m Höhe die Zunahme nach 150 m Höhe wohl etwas geringer ist als sich nach der Theorie erwarten ließe. Es zeigt sich aber auch das bereits einsetzende leichte Rückdrehen des Windes zwischen den Höhen 100 m und 150 m. Die windreichste Richtung ist Südwest, die für den ausgewählten Zeitraum auch die häufigste ist. Hier wurde die Windgeschwindigkeit nur von jeweils einem Ausleger in einer Richtung verwendet. Die Daten zeigen, daß bei einem dicht am langjährigen Mittel liegenden Wert der Periode die 12 ms^{-1} -Schwelle in etwa 30 % der Gesamtzeit überschritten wird.

Die Ergebnisse der Messungen der Windgeschwindigkeitschwankungen wurden bisher nicht eingehend untersucht. Es konnte aber festgestellt werden, daß sie interessante und wichtige Informationen enthalten. Das Programm zur weiteren Sammlung solcher Daten, von denen etwa eine Zeitreihe von einer Stunde eine der verwendeten Kassetten füllt, wurde in Abhängigkeit von folgenden Kriterien entwickelt: Windgeschwindigkeit, Stabilität der Schichtung, Schauer- und Gewitterböen. Tabelle 3.2 enthält eine Übersicht über den geplanten Umfang des Datenmaterials.

4. Verwendung von Mastmeßwerten als Kalibrationspunkte für die Ergebnisse eines mathematisch-numerischen Grenzschichtmodells.

4.1 Das verwendete Modell.

Das von R.A. Pielke (1974) entwickelte Mesoscale-Modell liegt in einer modifizierten Version (University of Virginia Mesoscale Model (UVMM)) vor. Die vorgenommenen Änderungen sind bei Mahrer und Pielke (1977, 1978) sowie bei Pielke und Mahrer (1975) beschrieben.

Das hydrostatische, dreidimensionale Modellgleichungssystem enthält als abhängige Variable den Geschwindigkeitsvektor $\mathbf{W} = (U, V, W^*)$, die potentielle, virtuelle Temperatur θ , die spezifische Feuchte q und die Exner-Funktion Π . Diese Variablen setzen sich aus Anteilen der synoptischen Scala und über ein Gittervolumen gemittelten zusammen.

An prognostischen Beziehungen treten auf:

- a) die horizontalen Eulerschen Bewegungsgleichungen für die Windkomponenten (U, V) mit Transport-, Coriolis-, Druckgradient- und turbulentem, vertikalem Diffusionsterm,
- b) die thermische Energiegleichung für θ unter diabatischen Bedingungen mit Transport-, turbulentem Vertikaldiffusions- und Strahlungsanteil,
- c) die Erhaltungsgleichung für die spezifische Feuchte q mit Transport- und Vertikaldiffusionsterm.

An diagnostischen Gleichungen sind enthalten:

- a) die inkompressible Kontinuitätsgleichung,
- b) die hydrostatische Grundgleichung.

Im synoptischen Scale wird die Geschwindigkeit innerhalb der planetarischen Grenzschicht iterativ während sechs Inertialzyklen aus der quasistationären Balance von Druckgradient-, Coriolis- und turbulentem Reibungsterm zum Anfangszeitpunkt berechnet. Oberhalb der

Grenzschicht erfolgt eine Spezifikation durch die geostrophische Scherung. Die potentielle, virtuelle Temperatur und die spezifische Feuchte desselben Scales sind anfangs als Vertikalprofile vorgegeben.

Als Randbedingungen für die diagnostischen Gleichungen sind notwendig:

- a) eine verschwindende Vertikalgeschwindigkeit am Boden,
- b) eine Bodendrucktendenzgleichung, abgeleitet unter der Bedingung, daß der Massenfluß durch die Modellobergrenze null ist, d.h., daß sich das Luftvolumen unterhalb durch thermodynamische Prozesse bedingt, dem hydrostatischem Gleichgewicht entsprechend, vertikal ausdehnen kann (freie Modellobergrenze).
- c) Dies wird durch eine Tendenzgleichung für die Modellobergrenze, erhalten aus der Kontinuitätsgleichung, berücksichtigt.

Die Höhe der planetarischen Grenzschicht H ergibt sich aus einer prognostischen Gleichung nach Deardorff (1974), während die Höhe der Prandtlschicht durch $H/25$ definiert ist.

Die Rauigkeitslänge der Landoberfläche ist konstant, während sie für Wasser in Abhängigkeit von der Schubspannungsgeschwindigkeit nach Clarke (1970) berechnet wird.

Die Temperatur an der Boden- Luft- Grenzschicht berechnet sich aus der Energiehaushaltsgleichung für dieses Niveau, bestehend aus langwelligem und kurzwelligem Strahlungsfluß, Bodenwärme fluß sowie turbulenter Mischung von sensibler und latenter Wärme.

Die Temperatur an der Wasser- Luft- Grenzschicht ist festgelegt durch einen Anfangswert und invariant während der Integrationsphase.

Die Änderungen der Lufttemperatur durch kurz- und langwellige Strahlungsflüsse sind entsprechend den Methoden von Atwater und Brown (1974) parameterisiert. Die kurzwellige, solare Erwärmungsrate wird durch die Absorption des Wasserdampfes bestimmt, während Kohlendioxyd und Wasserdampf zusammen bei dem Erwärmungs-/Abkühlungsprozeß betrachtet werden.

Die turbulenten vertikalen Flüsse von W , θ , q werden durch den Ansatz $K_z^\alpha \frac{\partial \alpha}{\partial z}$ berechnet. Die Berechnungen für die Prandtlschicht basieren auf der Monin-Obukhov'schen Ähnlichkeitstheorie mit Φ - Funktionen nach Businger (1973). Für die turbulenten Austauschkoeffizienten wird hierbei eine lineare Abhängigkeit von z angenommen. In der Ekman-Schicht wird ein Polynomansatz 2. Grades in z nach O'Brien (1970) für diese Koeffizienten verwendet.

4.2 Die notwendigen Anfangsdaten.

Synoptische Daten bilden den Ausgangspunkt zur Berechnung des Windfeldes. Es gehen folgende Anfangswerte ein:

1. der geostrophische Wind in Betrag und Richtung,
2. großräumiger Druckwert (konstant),
3. vertikales Profil der potentiellen virtuellen Temperatur,
4. vertikales Profil der spezifischen Feuchte,
5. die Höhe der planetarischen Grenzschicht (meist morgens),
6. Wassertemperatur,
7. Bodentemperaturverteilung in der Vertikalen.

Aufgrund von Häufigkeitsverteilungen vor allem der Temperatur bzw. ihrer Gradienten, des geostrophischen Windes, des Drucks und der Wassertemperatur lassen sich klimatologisch repräsentative Modellläufe definieren.

Manier und Dietzer (1978) fanden an fast allen küstennahen Stationen untereinander sehr ähnliche Häufigkeitsverteilungen des geostrophischen Windes für einen fünfjährigen Zeitraum. Ein Vergleich von Häufigkeitsverteilungen des geostrophischen Windes für die Zeit von Mai 1979 bis April 1980, berechnet für die Turmstandorte in Norddeutschland, ergibt außerordentlich ähnliche Häufigkeitsverteilungen.

In Abb. 4.1 ist die Häufigkeitsverteilung und die zugehörige kumulative Verteilung für den Standort Tating abgebildet. Aus der kumulativen Verteilung lassen sich nun bestimmte Perzentilen abgreifen, um durch die Simulation mit typischen Werten klimatologisch repräsentative Datensätze zu gewinnen.

Weitere charakteristische Anfangswerte sind die horizontale Gitterdistanz, der Rauigkeitsparameter für Land und die Vertikalauflösung.

4.3 Klimatologisch repräsentative Ergebnisse von Modellläufen.

Für eine Simulation wurde das Winterhalbjahr 1979/80 zugrunde gelegt, mit einem geostrophischen Wind annähernd von 12 ms^{-1} , entsprechend der 67 % Perzentile.

Für die Rechnungen wurde ein Geländeschnitt durch Schleswig-Holstein etwa längs einer Linie Tating-Eckernförde (auf beiden Seiten ca. 80 km auf das Meer hinaus) gewählt. So bot sich die Möglichkeit, die Modellergebnisse mit Messungen an den Türmen in Tating und Bredstedt zu vergleichen.

Zur Initialisierung wurde ein Tag mit Strahlungswetter ausgewählt.

Die horizontale Maschenweite beträgt $\Delta x = 8 \text{ km}$ und der Zeitschritt $\Delta t = 60 \text{ s}$. Die vertikale Auflösung ist variabel, von 3 m am Boden bis zu 1700 m an der Modellobergrenze (ca. 6000 - 7000 m). Als äußere Erzwingung wirken ein geostrophischer Wind von 12 ms^{-1} und die dem Land durch Strahlungsprozesse aufgeprägte Temperaturwelle. Weitere Mechanismen sind differentielltes Heizen von Land und Wasser sowie deren Rauigkeitsunterschiede. Zum Vergleich wurde auch ohne diabatische Erwärmung gerechnet sowie die Rauigkeit um eine Größenordnung verkleinert (von $z_0 = 0.5 \text{ m}$ auf $z_0 = 0.05 \text{ m}$).

Die Abb. 4.2 zeigt Ausschnitte der Vertikalschnitte für das Windfeld im Bereich der Nordseeküste jeweils nach 2 und 8 Stunden Integrationszeit (Beginn der Rechnungen ca. 5.45 Uhr). Deutlich ist die Windgeschwindigkeitsabnahme im Küstenbereich (bzw. Küstenvorfeld) und über Land infolge der geänderten Untergrundeigenschaften zu erkennen, ferner auch entsprechend der größeren Turbulenz das Ansteigen der Grenzschichthöhe.

Weiterhin zeigt die untere Abbildung, daß mit der Vertiefung der Mischungsschicht im Laufe des Tages über Land die Höhe der PBL sowie die Windgeschwindigkeit ansteigt.

In der Abbildung 4.3 sind die Vertikalprofile der Windgeschwindigkeiten an den Meßtürmen in Schleswig-Holstein, Tating und Bredstedt, und die Modellergebnisse für den am nächsten gelegenen Gitterpunkt, auch für eine adiabatische Modellatmosphäre sowie eine kleine Rauigkeit, zum Vergleich gegenübergestellt. Die Vergleichsmeßprofile wurden für einen ähnlichen geostrophischen Wind (in Richtung und Betrag) aus Messungen in der Zeit vom 1.1.80 bis 31.3.80 ausgewählt. Im Rahmen seiner physikalischen Möglichkeiten gibt das Modell die gemessenen Profile qualitativ und größenordnungsmäßig richtig wieder. Abweichungen ergeben sich vor allem durch unterschiedliche synoptische Situationen, wie z.B. Frontannäherung, Stabilität/Labilität u.a..

Durch Strahlungsprozesse simuliert das Modell einen Tagesgang der Bodentemperatur und durch Erwärmung der darüberliegenden Luftschichten auch der Lufttemperatur. Die Form des Windprofils ist stabilitätsabhängig. Dies läßt sich in recht einfacher Weise durch das Potenzgesetz beschreiben, dessen Koeffizient p stabilitätsabhängig ist.

Tabelle 4.1 zeigt den vom Modell berechneten Tagesgang dieses Koeffizienten (zwischen 10 und 50 m) im Vergleich zu einigen mittleren Monatstagesgängen zwischen 12.5 und 46 m des Winters 1979/80. Es zeigt sich prinzipiell derselbe Tagesgang, mittags infolge der geringeren Stabilität eine Abnahme und entsprechend gegen Abend eine Zunahme. Die Amplitude der modellberechneten Werte und der gemessenen unterscheidet sich;

dies läßt sich eventuell durch die im Modell fehlende Konvektionsparameterisierung (Cumulus-Scale) erklären, da hierdurch die sehr effektive konvektive Durchmischung entfällt.

Abb. 4.4 zeigt ein Tagesprofil (gemittelt über 24 Stunden) der Modellergebnisse und dazu im Vergleich das mittlere Profil für die Turm Daten in Tating für den Winter 1979/80 über alle Richtungen gemittelt und für die SW-Windrichtung.

Zur Ergänzung zeigt die Abb. 4.6 für die morgendliche und mittägliche Situation eine Gegenüberstellung von modell-berechneten Profilen und für die entsprechende Uhrzeit (Stunde) das mittlere monatliche Profil der Turm Daten von Tating für verschiedene Monate. In der linken Abbildung (morgens) ist hier deutlich die Zunahme des vertikalen Gradienten des Windes mit zunehmenden geostrophischem Wind zu sehen.

Gegen Mittag ist eine etwas abweichende Situation gegeben, die zu diesem Zeitpunkt besonders witterungsabhängig ist.

5. Der Wind im Küstenvorfeld, ein Vergleich von numerisch berechneten und gemessenen Werten.

5.1 Vorbemerkungen.

Wie schon Prager (1941) quantitativ bestätigte, zeichnet sich das Windfeld über der Meeresoberfläche durch relativ hohe Windgeschwindigkeiten aus. Weiterhin ist die Windrichtung über See gegenüber Land wegen der höheren Reibung rechtsgedreht. Sowohl über Land als über See ist die Geschwindigkeit im Herbst/Winter deutlich höher als im Frühjahr/Sommer. Nach Duensing und Zöllner (1978) gehört das Küstenvorfeld in einen für Windkraftnutzung günstigen Bereich.

Beim Übergang vom Meer zum Land vermindert sich die Windgeschwindigkeit infolge der Abbremsung; dieser Vorgang beginnt jedoch schon in einiger Entfernung von der Küstenlinie, im Küstenvorfeld. Ziel dieser Auswertung ist es, diesen Effekt durch gemessene Daten und numerisch berechnete zu beschreiben.

5.2 Statistische Auswertung von Windmessungen im Küstenvorfeld.

Die Grundlage dieser Auswertung bildeten Messungen von Feuerschiffen in der Nordsee und zum Vergleich einiger küstennaher Landstationen. In Tabelle 5.1 sind die Stationen im einzelnen aufgeführt; ihre Lage ist aus Abb. 5.1 ersichtlich.

Die Feuerschiffe in der Nordsee melden wie die Landstationen Daten, 10 min Mittelwerte im dreistündigen Rhythmus. Die Schiffsaufbauten können die Windmessungen beeinflussen; daher sind die überall verwendeten Schalenkreuzanemometer möglichst hoch an Auslegern einer der Masten angebracht, in der Regel in 18 m Höhe (Tab. 5.1). Diese Daten werden regelmäßig vom Deutschen Wetterdienst im Europäischen Wetterbericht veröffentlicht.

Zur Vergleichbarkeit der Winddaten ist eine Reduktion auf 10 m Standardniveau notwendig. Üblicherweise werden hierzu Profilmethoden verwendet, etwa nach dem Potenzgesetz oder dem logarithmischen Windprofil. Die Ausbildung des Profils wird aber stark von der Rauigkeit des Untergrundes und der thermischen Schichtung der Luft beeinflusst. Abb. 5.2 zeigt die Abhängigkeit des Windprofils von den thermischen Eigenschaften. Das logarithmische Profil erlaubt nach Panofsky (1973) eine gute Abschätzung bis zu einer Höhe von 150 m. Hierbei ist auch die Bestimmung des Rauigkeitsparameters z_0 erforderlich (Tab. 5.1).

Die Station Norderney liegt mit $z_0 = 15$ cm in einem relativ rauen Gebiet, so daß sich die rein adiabatische Reduktion hierfür nicht so gut eignet. Wieringa

(1977) hat ein Nomogramm vorgeschlagen um die Windgeschwindigkeit in derartigen Fällen für offenes Gelände zu reduzieren. Man erhält so einen für die Strömung des synoptischen Scales repräsentativen Windwert.

Wie aus Tabelle 5.1 bzw. Abbildung 5.2 ersichtlich, wurde versucht, einen Abstand aller Stationen von der Küstenlinie zu ermitteln. Für die Feuerschiffe "P 8", "P 12" und "Weser" ergibt sich eine eindeutige Lösung. Für "Elbe 1" wurde eine "mittlere" Küstenlinie im Bereich der Wesermündung und der Jade festgelegt. Für Bremerhaven ist die Bestimmung schwierig. Eine Analyse der Häufigkeit auftretender Windrichtungen zeigt eindeutig die N-NW-Komponente als bevorzugt; 80 % der betrachteten Situationen umfassen diese Windrichtungen. So wurde aus der Richtungshäufigkeitsverteilung ein mittlerer Abstand berechnet (Abb. 5.2).

5.3 Darstellung der Auswahlkriterien.

Es wurden Auswahlkriterien so festgelegt, daß der Effekt der Windgeschwindigkeitsabnahme im Küstenvorfeld exemplarisch darstellbar wurde. Dies ist sicherlich nur in einer möglichst ungestörten Luftströmung möglich. Weiterhin ist zu erwarten, daß bei einem Übergang von Meer zu Land, d.h. von glatterem zu rauherem Untergrund, und zudem auch wegen der vergleichsweise großen Geschwindigkeiten über der Wasseroberfläche sich der Abbremsungseffekt bei dieser auflandigen Windsituation besonders ausgeprägt zeigt.

Für die vor allem in Ost-West-Richtung verlaufende Küste wurde die Nordwindrichtung mit einer Abweichung von $\pm 30^\circ$ über See und $\pm 40^\circ$ über Land ausgewählt. Ferner mußte an allen Stationen ein Schwellwert von mindestens 8 Knoten ($1 \text{ Knoten} = 0.515 \text{ ms}^{-1}$) erreicht werden, da unterhalb von dieser Geschwindigkeit der Einfluß der Lokalzirkulation zu deutlich ist.

Entsprechend Geb (1971) sollten innerhalb einer Luftmasse in einem horizontalen Bereich mit einem Durchmesser von $> 500 \text{ km}$ (definitionsgemäß) die charakterisierenden (konservativen) Eigenschaften quasihomogen sein. Dies Kriterium wurde hier beachtet.

Da die thermischen Verhältnisse der Atmosphäre die Entwicklung des Windfeldes stark beeinflussen, wurden möglichst temperaturhomogene Fälle gesucht, wobei die Temperaturen aller Stationen auf See und Land nur um 3 Grad voneinander abweichen durften.

Da die Anströmung von See erfolgte, wurde vor allem die Richtungsstationarität bewertet; die Windrichtung mußte an allen Seestationen während mindestens 6 Stun-

den (aktueller Termin ± 3 Stunden) aus Nord mit $\pm 30^\circ$ kommen. Über Land waren größere Abweichungen zugelassen, zumal dort schon ein geringerer Tagesgang der Stabilität zu Winddrehungen führt.

Wegen der geringen Zahl der so gefundenen Fälle wurden nur Beobachtungstermine verwendet, für die alle Stationen meldeten.

Es wurden Daten der Monate Oktober bis März (Winterhalbjahr) der Jahre 1958/59 und 1962-1970 ausgewertet. Vor allem die Station Norderney meldete in diesem Zeitraum während der Abend- und Nachttermine oft nicht.

In weit geringerem Maße fehlten Meldungen der anderen See- und Landstationen. Die Station Bremen wurde in die Analyse nicht mit einbezogen, sondern diente nur als Vergleichsstation.

In Abb. 5.3 ist ein charakteristisches Beispiel dargestellt. Zusammen mit der Situation zum 12 Uhr Termin sind auch die Termine ± 3 Stunden abgebildet. Weiterhin findet man dort eine Karte mit den reduzierten Geschwindigkeiten (s. Kap. 5.2) für 12 Uhr.

5.4 Darstellung der Ergebnisse.

Aus Tabelle 5.2 ist die Anzahl der Fälle je Geschwindigkeitsklasse (X) und die kumulative Häufigkeit (Y) für jede Station zu ersehen.

Für jede beliebige Verteilungsfunktion $F(z)$ existiert eine Zahl M (Median), so daß $F(M) = 1/2$ ist. Eine mathematische Erwartung muß nicht existieren. Die mathematische Erwartung der Gaußverteilung entspricht ihrem Median. Nach Sachs (1969) ist bei der Beschreibung von schiefen Verteilungen, wie der vorliegenden, der Median zu verwenden. Ferner empfiehlt sich seine Anwendung bei geringer Zahl von Fällen. Eine Schätzung des Medians für $F(X)$ erfolgt nach Sachs (1969) mit

$$M = X_{nm} \frac{\frac{n}{2} - \sum_{i=1}^{m-1} f_i}{f_m} h \quad (5.1)$$

wobei

m diejenige Klasse kennzeichnet, in die der Median fällt,

X_{nm} exakte untere Grenze der Geschwindigkeitsklasse,

h Klassenbreite,

f_i Anzahl der Werte je Klasse.

In Tabelle 5.2 sind auch die Medianschätzwerte eingetragen. Der formal errechnete Wert wird in der ersten Zeile mitgeteilt, während die darunter stehenden Werte durch Höhenkorrekturen aus dem Windprofil (s. Kap. 5.2) ermittelt wurden.

5.5 Initialisierung der Modellläufe.

Die Wahl des geostrophischen Windes erfolgte entsprechend der Häufigkeitsverteilung (s. Kap. 4.3) wie in Tabelle 5.3 angegeben.

Um dem Auswahlkriterium der Temperaturhomogenität möglichst nahe zu kommen, wurde ein adiabatisches Temperaturprofil vorgegeben, d.h. konstante potentielle Temperatur. Weiterhin wurde über Land ohne Bodenheizung gerechnet. Weitere charakteristische Anfangswerte waren:

horizontale Gitterdistanz	8 km
Rauhigkeitsparameter über Land	50 cm
Wassertemperatur	6° C
Anzahl der Niveaus	16.

Die Vertikalauflösung ist variabel und nimmt nach oben hin ab.

Nach Integration bis zur Stationarität wurde ein selektiver Filter auf die Felder angewendet, um hochfrequente (numerische) Anteile zu entfernen. Da die Effekte nur sehr klein sind, reicht ein recht einfacher Filter, wie z.B. von F.G. Shuman (1958) vorgeschlagen aus (Gleichung 5.2).

$$\bar{v}_i = v_i + \frac{1}{2} \mu (v_{i-1} - 2v_i + v_{i+1}), \quad (5.2)$$

wobei μ als Filterelement bezeichnet wird.

Die Anwendung dieses Filters auf ein Feld der Form

$$v = C + A e^{ik(x_i - \bar{x})} \quad (5.3)$$

mit \bar{x} einer Konstanten, deren Wert von der Phase abhängt,
 und k der Wellenzahl,
 zeigt die wesentlichen Eigenschaften dieses Filters.
 Weder die Phase noch die Wellenzahl werden geändert.
 Nur die Amplitude wird wellenlängenabhängig beeinflusst:

$$\bar{b} = \frac{\bar{A}}{A} = 1 - \mu(1 - \cos k \Delta x). \quad (5.4)$$

Positive Werte von \bar{b} führen zu einer Verminderung der Amplitude. Eine Verbesserung der Selektivität ist durch mehrmaliges Anwenden von Filterelementen möglich (Shuman, 1958).

Eine gute Glättung bzw. Filterung ergab sich mit folgenden Elementen:

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 0.48888; \mu_1 = -0.05555 + i0.3212; \\ \mu_2 &= -0.05555 - i0.3212. \end{aligned} \quad (5.5)$$

In Abb. 5.4b ist ein Teil der Abb. 5.4a dreifach überhöht herausgezeichnet und zeigt die Wirkung des Filters.

Die Größe des numerischen Effekts ist vom Wert des geostrophischen Windes abhängig. Hierdurch kann erklärt werden, daß der Beginn des Windgeschwindigkeitsabfalls in ca. 25 km Entfernung vor der Küste an unterschiedlicher Stelle einsetzt. Allerdings sind die durch das Filter erzielten Unterschiede in den Ergebnissen in diesem Bereich so klein, daß sie auch instrumentell nicht mehr auflösbar sind.

In Abb. 5.4 ist die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zur Küstenlinie für verschiedene geostrophische Windgeschwindigkeitswerte dargestellt.

Die Differenz der Geschwindigkeit zwischen Küstenvorfeld und Land wächst mit zunehmendem geostrophischen Wind an. Die Kurve für eine Geschwindigkeit von 16 ms^{-1} zeigt, wie gut die Modellergebnisse zu den statistisch berechneten Geschwindigkeiten passen.

In Abb. 5.5 ist die Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zur Küstenlinie für 16 ms^{-1} geostrophischen Wind für verschiedene Höhen dargestellt. Infolge der geringen Reibung über See setzen sich die höheren Windgeschwindigkeiten bis in kleine Höhen durch. Bemerkenswert ist, daß der Wert des geostrophischen Windes über Wasser bereits in 150 m Höhe erreicht wird.

Der Abbremsungseffekt wirkt in den unteren Schichten der Atmosphäre stärker als weiter oben, d.h. die Geschwindigkeitsabnahme vom Meer zum Land hin ist in 10 m größer als in 100 oder 150 m. Dies zeigen auch von Duesing und Zöllner (1978) aus dem 10 m-Niveau nach dem Potenzgesetz extrapolierte Winddaten für 100 und 150 m Höhe.

6. Schlußbemerkung.

Die Windmessungen in großer Höhe und über einen längeren Zeitraum haben bei der Bestimmung des Windenergiepotentials und der Ermittlung von möglichen Lastfällen eine große Bedeutung. Für die Bestimmung des Windenergiepotentials lassen sie sich zur Beurteilung der Qualität von vertikaler Extrapolation von Windgeschwindigkeitswerten verwenden. Darüber hinaus erlauben sie als Stützstelle für numerisch-mathematische Grenzschichtmodelle eine Eichung des Modells. Insbesondere bei der Ermittlung des Windenergiepotentials im Küstenvorfeld mit nur wenigen bodennahen Meßpunkten ist die Bedeutung solcher Messungen sehr groß. Die Beurteilung von Lastfällen ist ein weiterer sehr wichtiger Punkt, da in den Höhen von oberhalb 50 m über Grund die Windverhältnisse sich gegenüber am Boden grundsätzlich verändern.

7. Literaturverzeichnis.

- Atwater, M.A., Brown, P.S.; 1974: Numerical calculation of the latitudinal variation of solar radiation for an atmosphere of varying opacity. J. Appl. Meteorol., 13, 289-297.
- Businger, J.A.; 1973: Turbulent transfer in the atmosphere surface layer. Workshop in micrometeorology, Amer. Meteorol. Soc., Chap. 2.
- Clarke, R.H.; 1970: Recommended methods for the treatment of the boundary layer in numerical model. Australian Meteor. Mag., 18, 51-73.
- Coppin, P.A., Tetzlaff, G.; 1980: Grundlagen für ein meteorologisches Meß- und Versuchsprogramm GROWIAN. Inst. f. Meteorologie u. Klimatologie Universität Hannover.
- Deardorff, J.; 1974: Three-dimensional numerical study of the height and the mean structure of a heated planetary boundary layer. Bound. Layer Meteorol., 7, 81-106.
- Duensing, G., Zöllner, R.; 1978: Die Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland im Hinblick auf die Nutzung der Windkraft: Teil II: Küstenvorfeld. Ber. d. Deutschen Wetterdienstes, Nr. 147.
- Geb, M.; 1971: Neue Aspekte und Interpretationen zum Luftmassen- und Frontenkonzept. Meteor. Abhandlungen, Inst. f. Meteor. Berlin, 109, Nr. 2.

- Mahrer, Y., Pielke, R.A.; 1977: The effects of topography on the sea and land breezes in a two dimensional numerical model. Mon. Wea. Rev., 105, 1151-1162.
- Mahrer, Y., Pielke, R.A.; 1978: A test of an upstream spline interpolation technique for the advective terms in a numerical mesoscale model. Mon. Wea. Rev., 106, 818-830.
- Manier, G., Dietzer, B.; 1978: Untersuchungen der Einflüsse der Orographie auf den Zusammenhang zwischen Häufigkeitsverteilungen des geostrophischen Windes und des Bodenwindes. 4. Teilbericht, UB II 2-230-01-38/78, Projekt des Umweltbundesamtes, Inst. f. Meteorologie, TH Darmstadt.
- O'Brien, J.J.; 1970: A note on vertical structure of the eddy exchange coefficient in the planetary boundary layer. J. Atmos. Sci., 27, 1213-1215.
- Panofsky, H.A.; 1973: Tower micrometeorology. Workshop on Micrometeorology, AMS.
- Pielke, R.A.; 1974: A threedimensional numerical model of the sea breeze over south Florida. Mon. Wea. Rev., 102, 115-139.
- Pielke, R.A., Mahrer, Y.; 1975: Technique to represent the heated planetary boundary layer in mesoscale models with coarse vertical resolution. J. Atmos. Sci., 32, 2288-2308.

- Prager, E.; 1941: Der Einfluß einer Flachküste auf Wind und Niederschlagsfeld. Archiv d. Deutschen Seewarte u. d. Marineobservatoriums, 61, Nr. 6.
- Sachs, L.; 1969: Statistische Auswertemethoden. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York.
- Shuman, F.G.; 1958: Numerical methods in weather prediction. II: Smoothing and Filtering. Mon. Wea. Rev., 85, 357-361.
- Wieringa, J.; 1977: Wind representativity increase due to an exposure correction, obtainable from past analog station wind records. WMO Techn. Conf. On Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg, Juli 1977.

8. Verzeichnis der Abbildungen.

- Abb. 1.1: Skizze des meteorologischen Meßturmes bei Marne.
- Abb. 4.1: Häufigkeitsverteilungen des geostrophischen Windes für den Standort Tating.
- Abb. 4.2: Vertikalschnitte durch Schleswig-Holstein etwa längs einer Linie Tating-Eckernförde.
- Abb. 4.3: Vergleich zwischen numerisch berechneten und gemessenen (2 min-)Windprofilen für Tating.
- Abb. 4.4: Vergleich zwischen numerisch berechneten und gemessenen (monatlich gemittelten) Windprofilen für Tating.
- Abb. 4.5: Vergleich zwischen numerisch berechneten und gemessenen (gemittelt über das Winterhalbjahr) Windprofilen für Tating.
- Abb. 5.1: Lage der deutschen Feuerschiffe in Nord- und Ostsee.
- Abb. 5.2: Das Windprofil zu verschiedenen Tageszeiten bei Strahlungswetter und gleicher Windgeschwindigkeit.
- Abb. 5.3: Charakteristisches Beispiel zur Anwendung der Auswahlkriterien.
- Abb. 5.4a: Die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zur Küstenlinie für verschiedene geostrophische Winde und ein Vergleich mit Meßergebnissen.
Darstellung der Ergebnisse.

Abb. 5.4b: Die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zur Küstenlinie für verschiedene geostrophische Winde und ein Vergleich mit Meßergebnissen.

Wirkung des Filters nach Shuman (1958).

Abb. 5.5: Die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zur Küstenlinie für 16 ms^{-1} geostrophischen Wind für verschiedene Höhen.

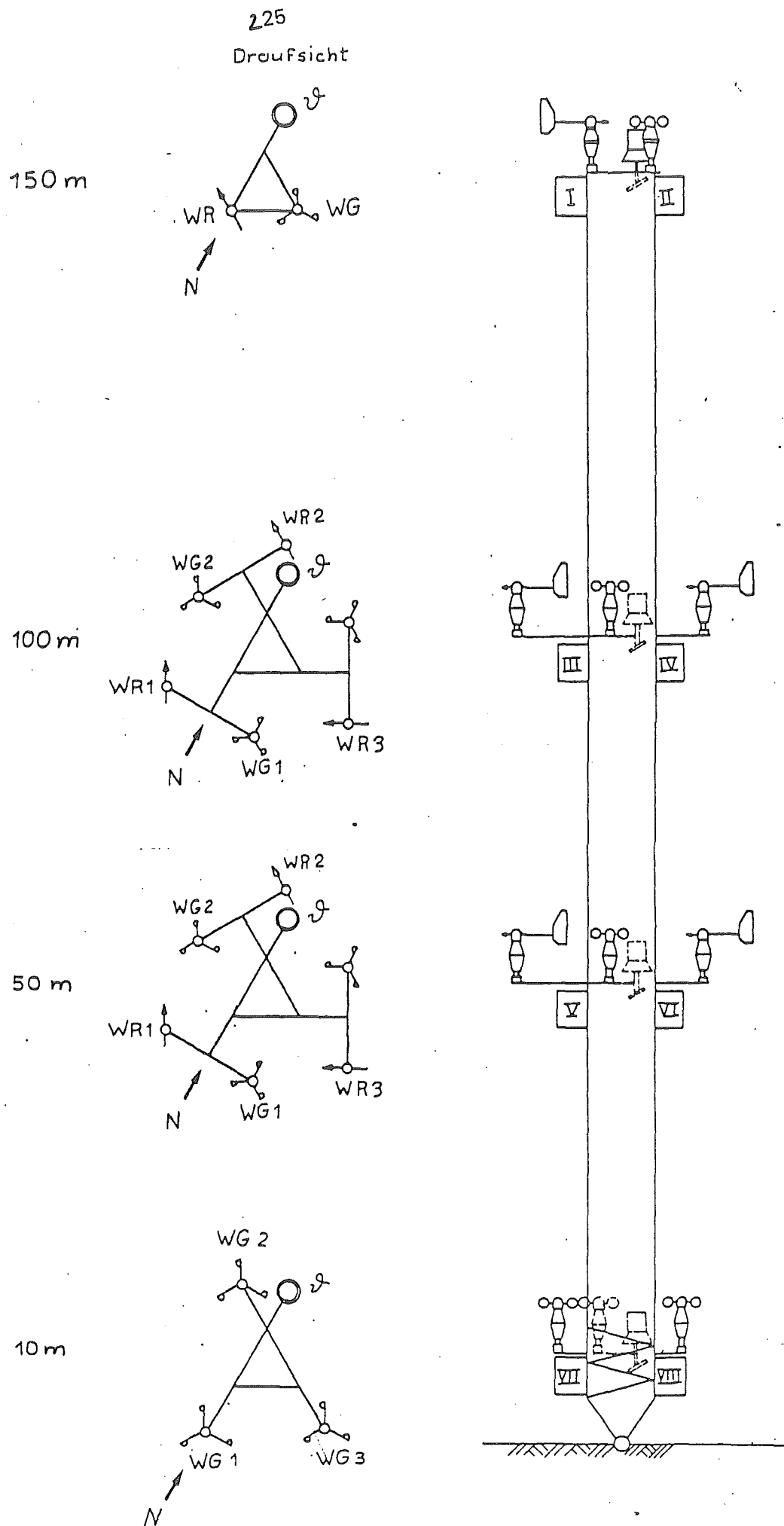


Abb. 1.1: Skizze des meteorologischen Meßturmes bei Marne.

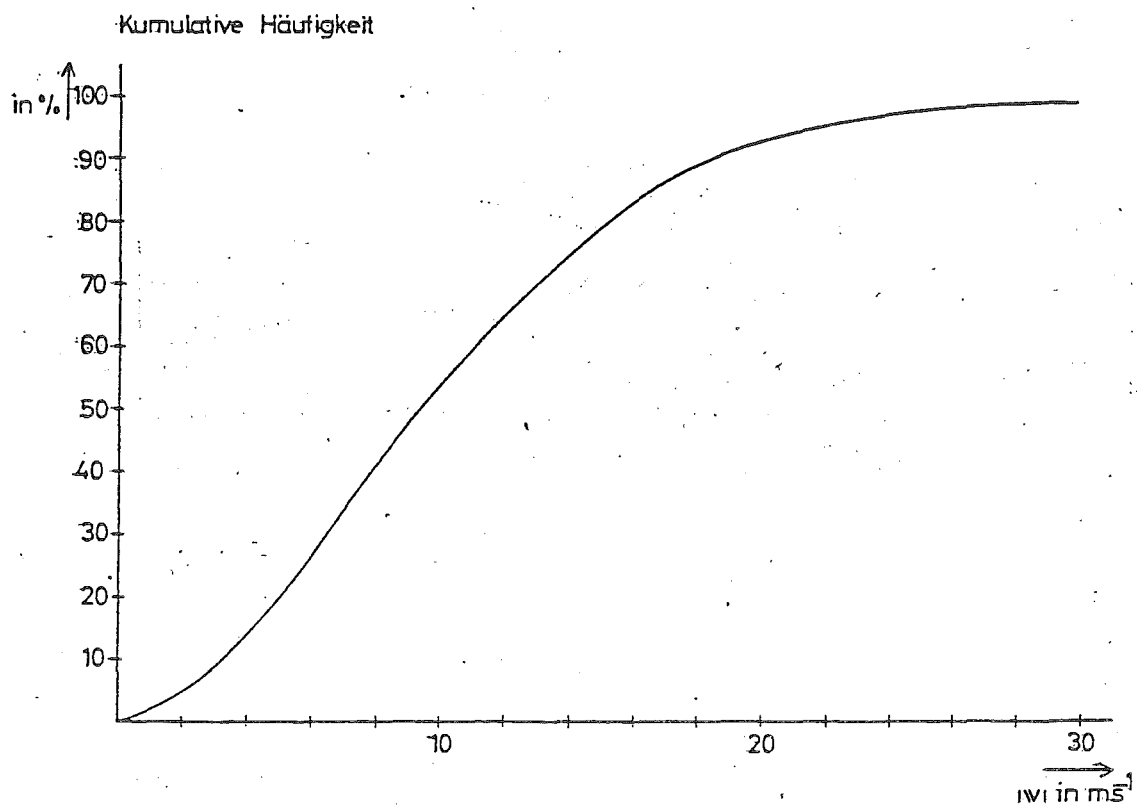
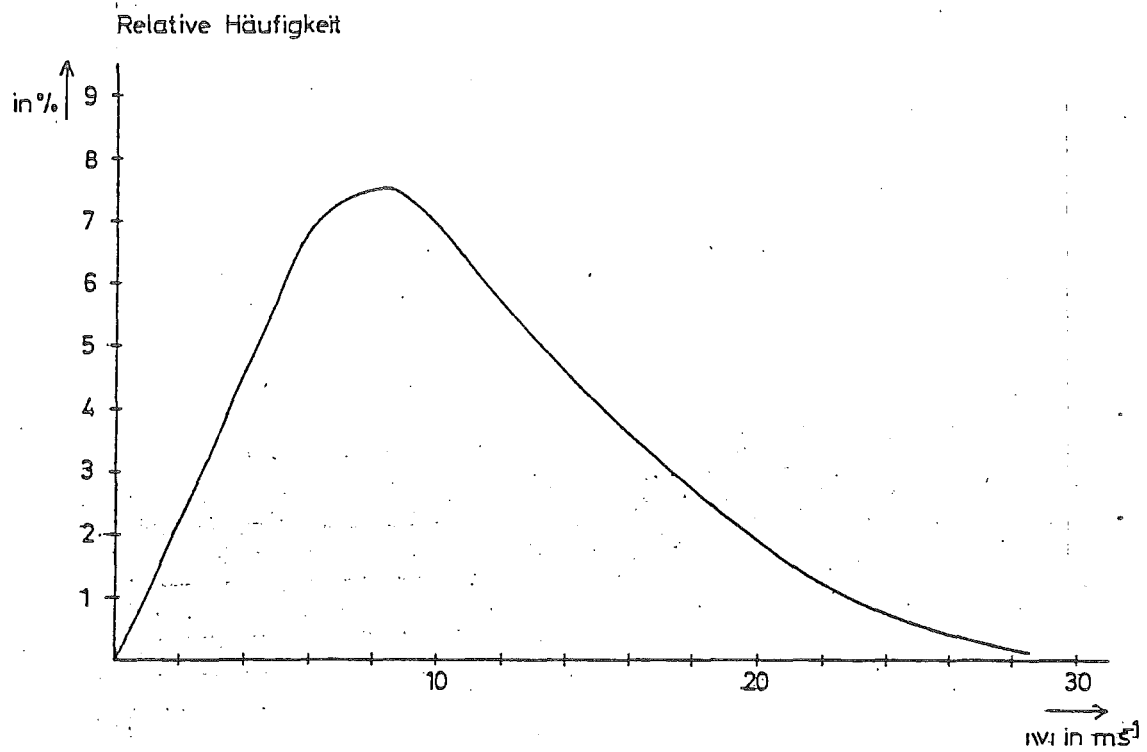
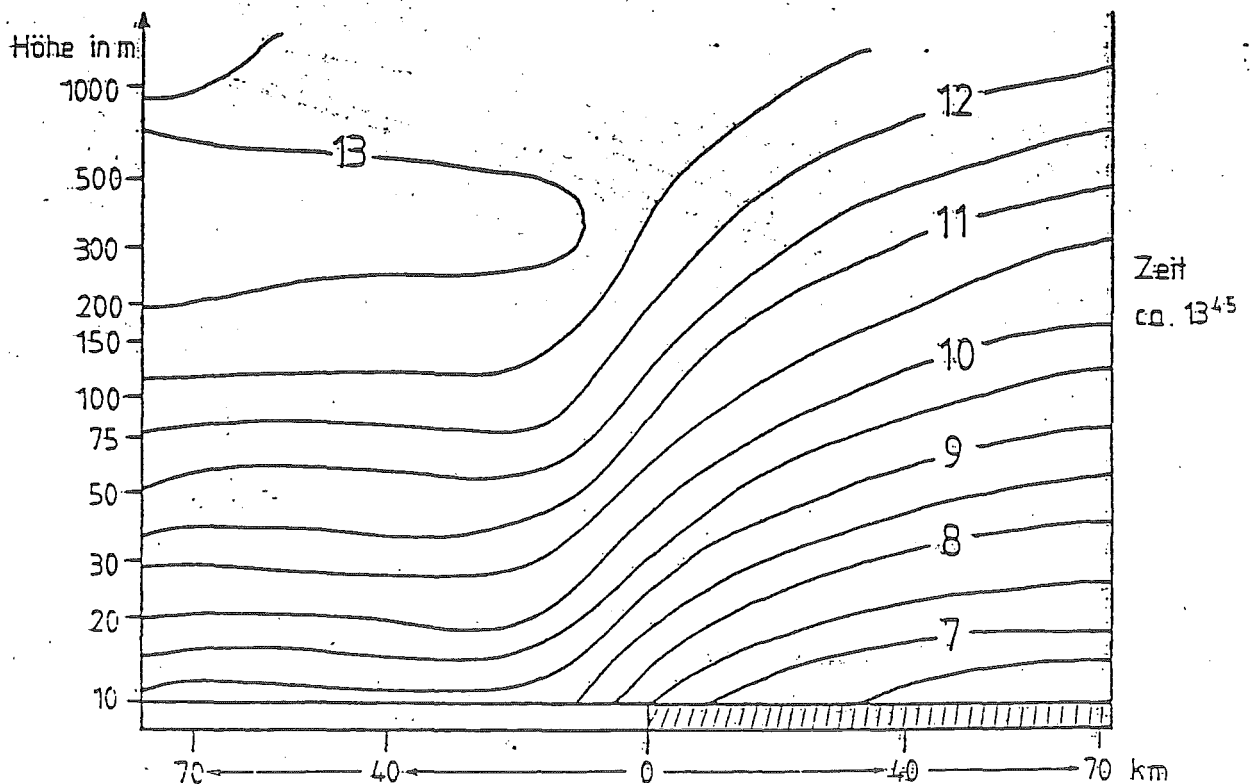
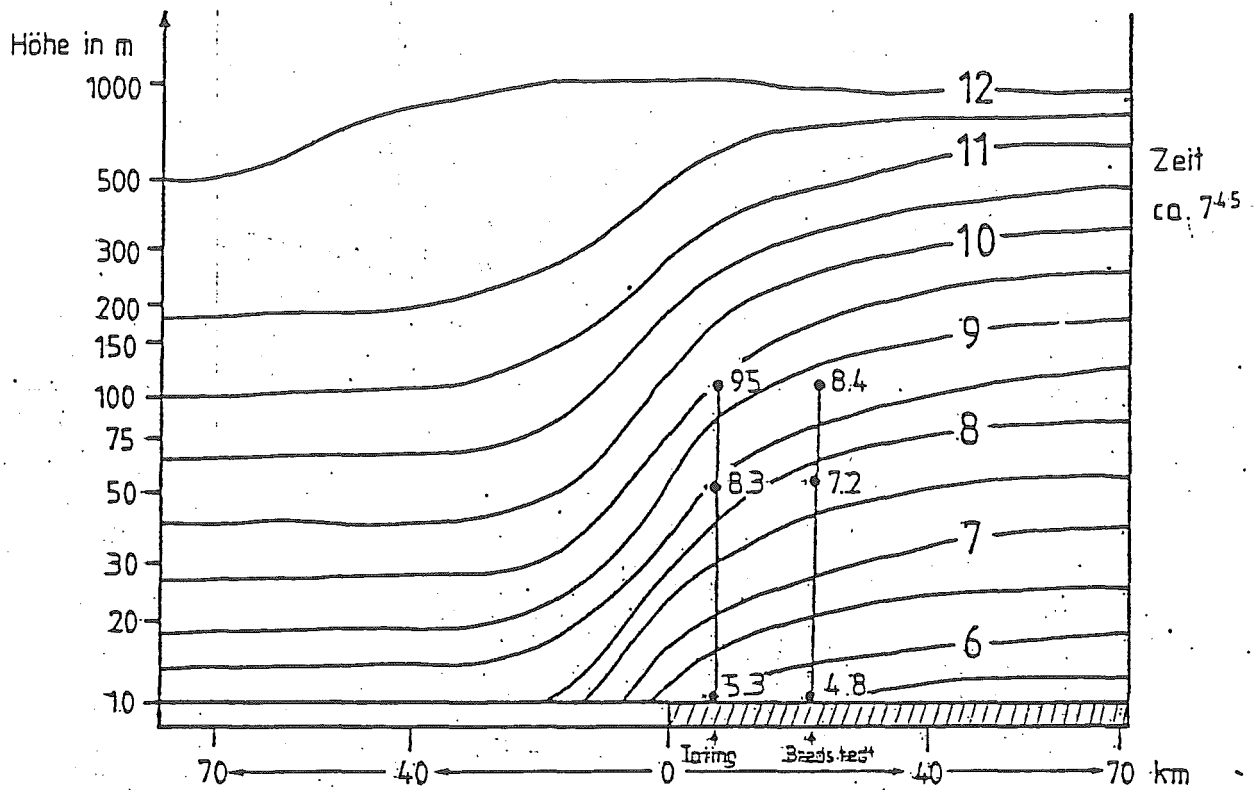


Abb. 4.1: Häufigkeitsverteilungen des geostrophischen Windes für den Standort Tating.

Abb. 4.2: Vertikalschnitte durch Schleswig-Holstein
etwa längs einer Linie Tating-Eckernförde.

$|V_g| = 12 \text{ m/s}$, Windrichtung von V_g : SW, $z_0 = 5 \text{ m}$, $T_{\text{ref}} = 279 \text{ K}$



Zeit: ca. 7⁴⁵

Zeit: ca. 13⁴⁵

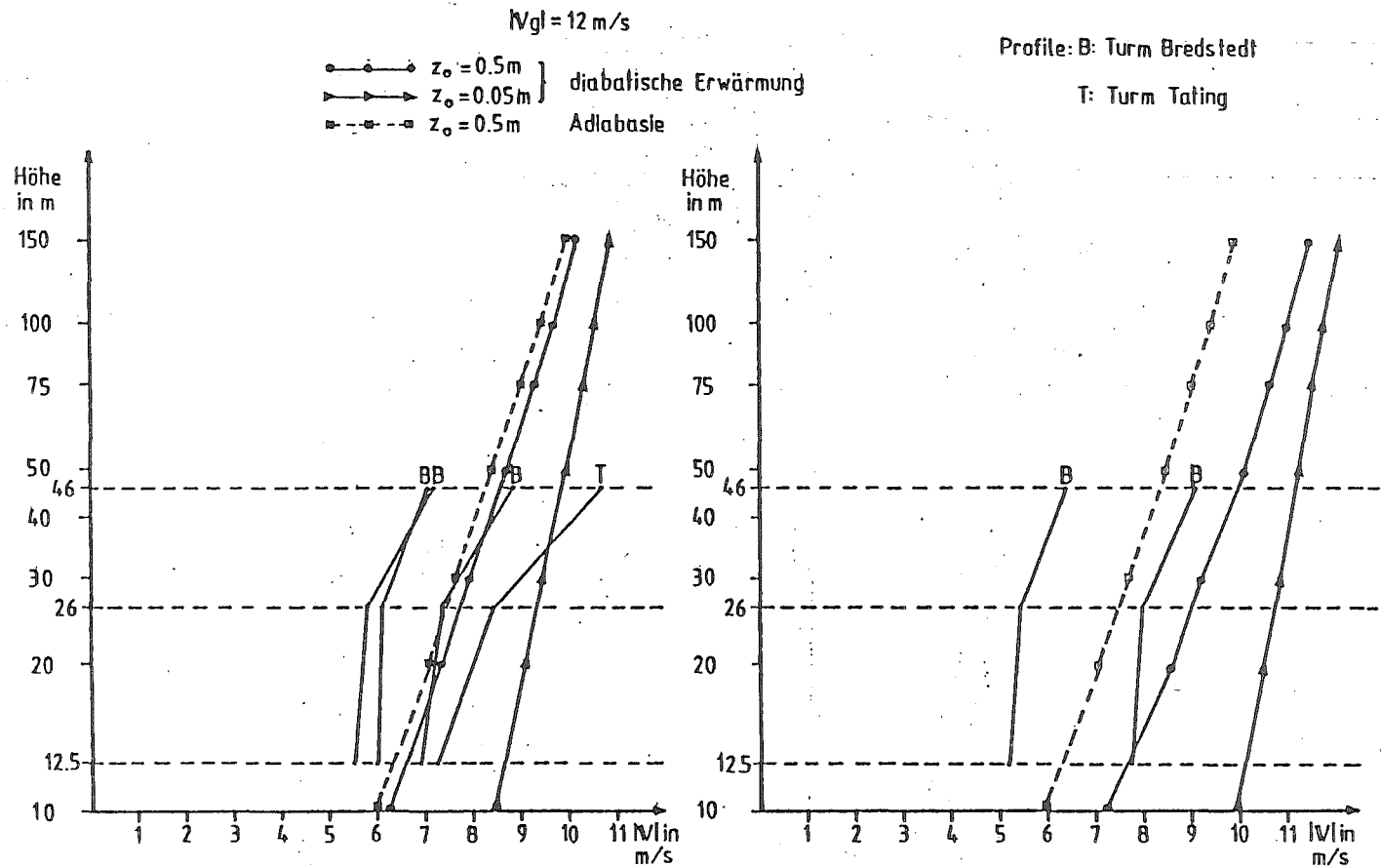


Abb. 4.3: Vergleich zwischen numerisch berechneten und gemessenen (2 min-)Windprofilen für Tating.

$V_{gl} = 12 \text{ m/s}$

—•—•—•— $z_0 = 0.5 \text{ m}$ diabatische Erwärmung

--- Profile: Turm Tating

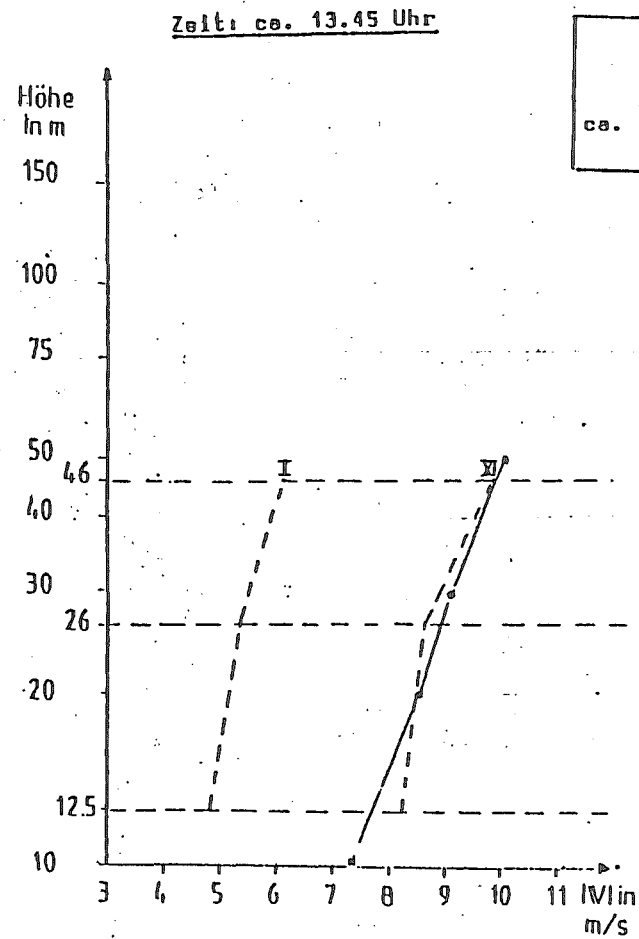
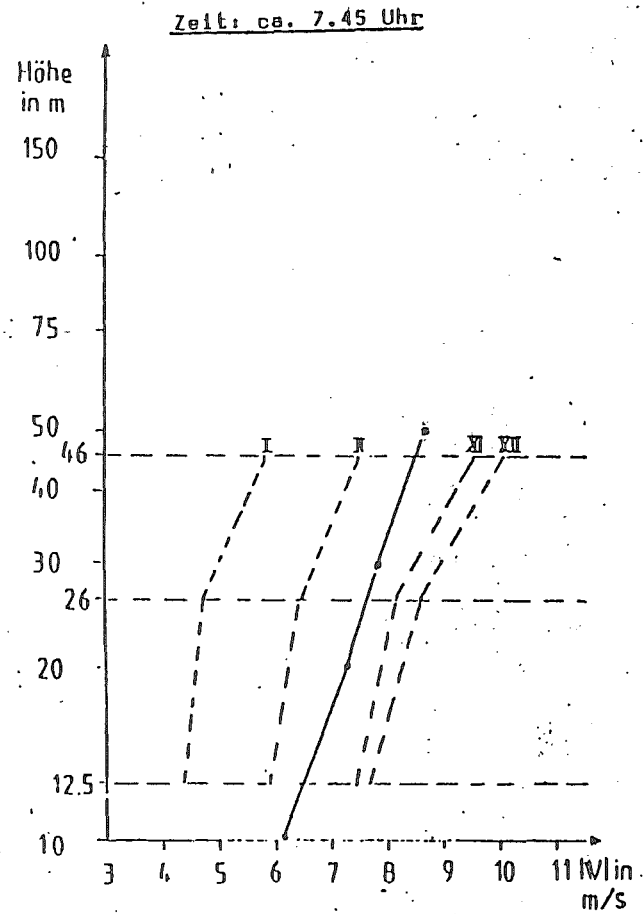


Abb. 4.4:

Vergleich zwischen numerisch berechneten
und gemessenen (monatlich gemittelten)
Windprofilen für Tating.

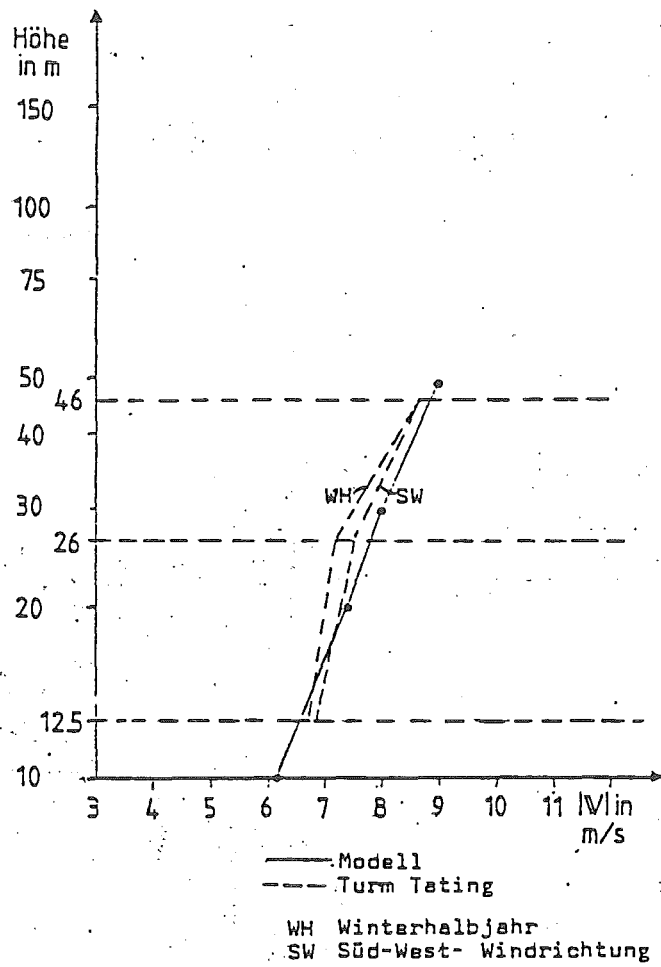


Abb. 4.5: Vergleich zwischen numerisch berechneten und gemessenen (gemittelt über das Winterhalbjahr) Windprofilen für Tating.

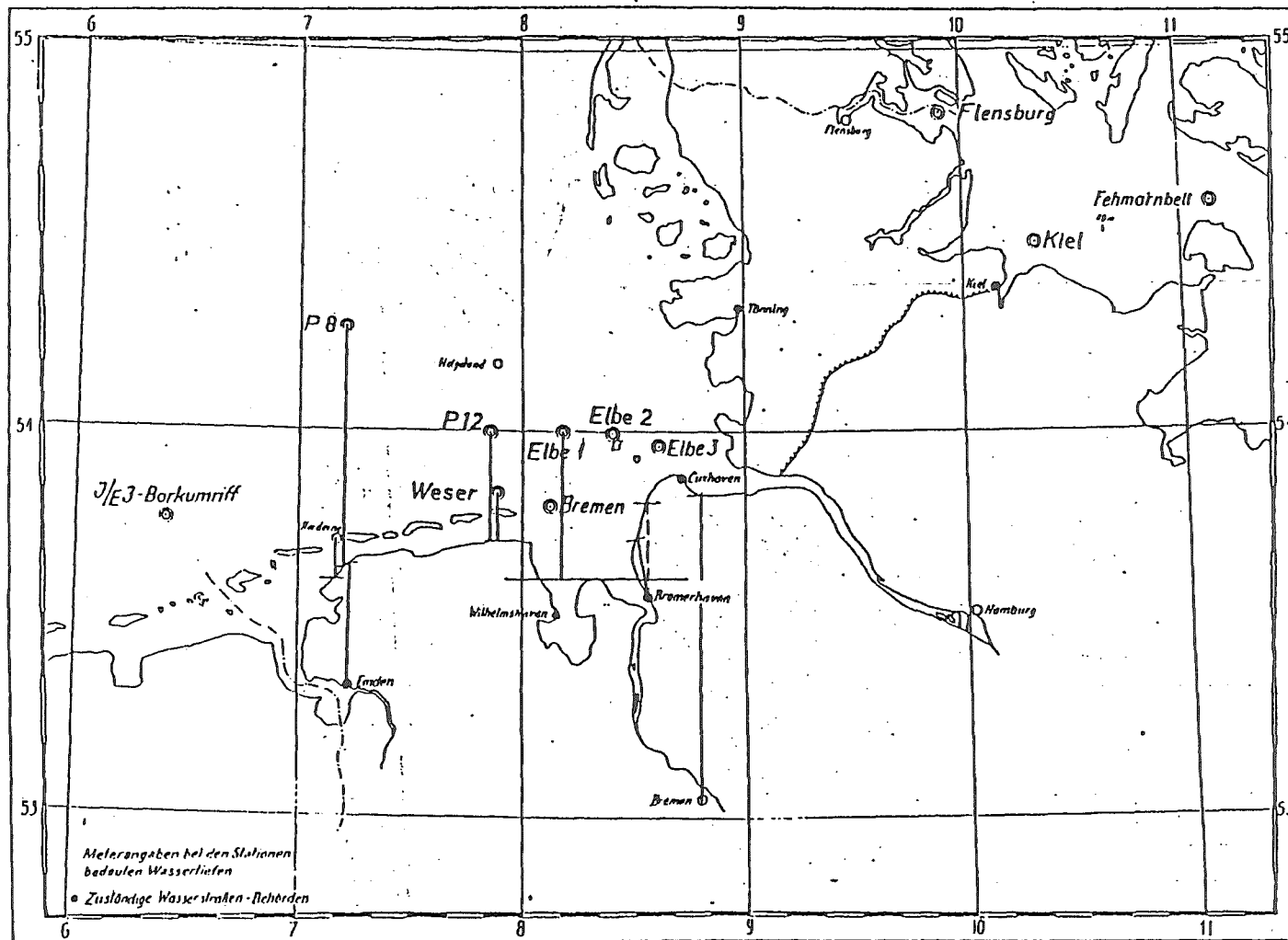


Abb. 5.1: Lage der deutschen Feuerschiffe in Nord- und Ostsee.

nachts (strichpunktiert)
 morgens und abends (ausgezogen)
 tags über (gestrichelt)

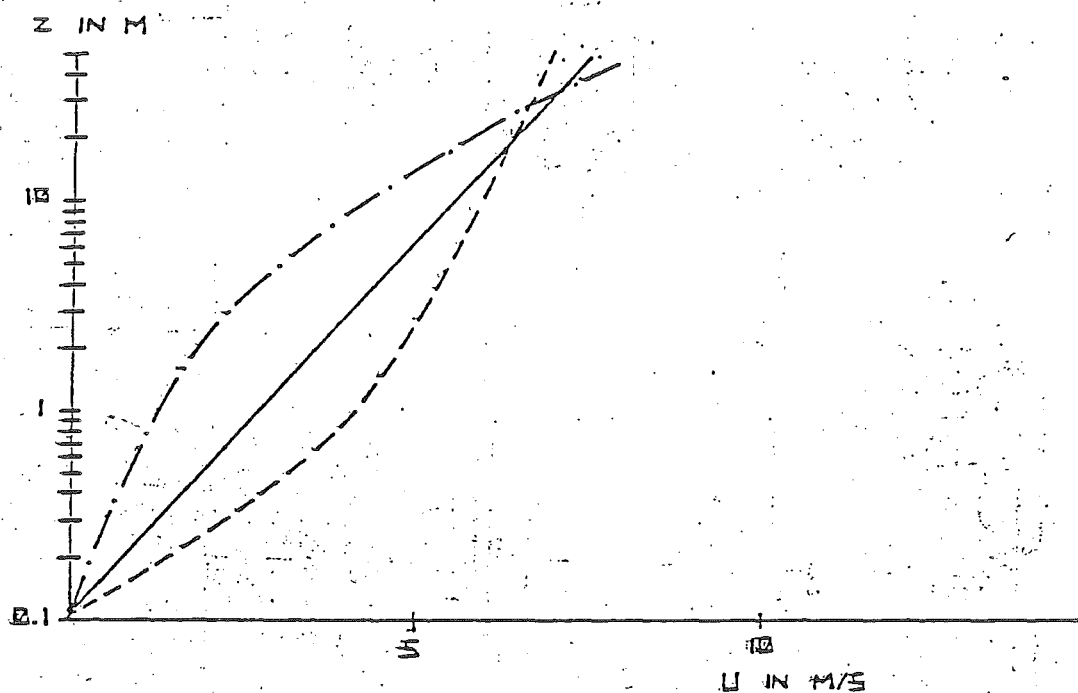


Abb. 5.2: Das Windprofil zu verschiedenen Tageszeiten bei Strahlungswetter und gleicher Windgeschwindigkeit.

Tag: 13.3.67

dd ff TT: dd:Windrichtung (/10) in Grad, auf 10 Grad genau
 ff:Windgeschwindigkeit in Knoten
 TT:Lufttemperatur in Grad Celsius

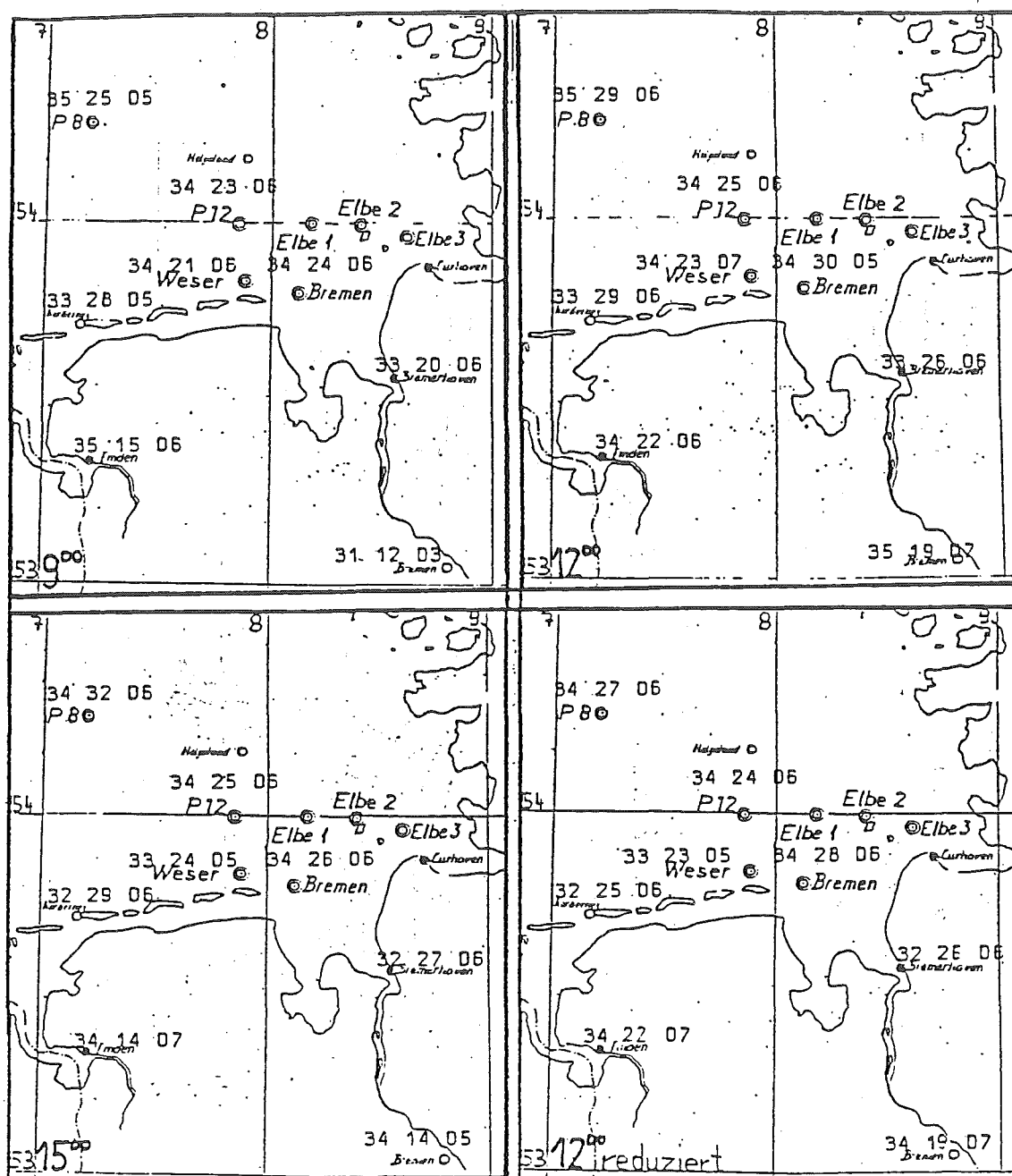


Abb. 5.3: Charakteristisches Beispiel zur Anwendung der Auswahlkriterien.

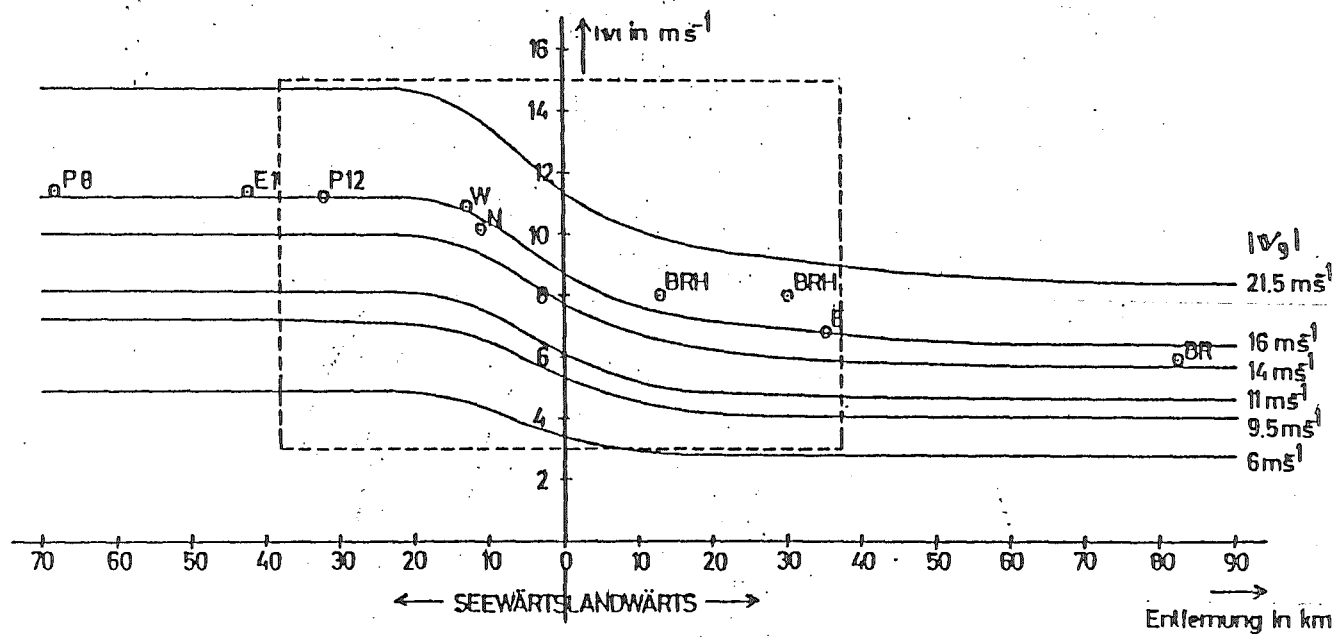


Abb. 5.4a: Die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zur Küstenlinie für verschiedene geostrophische Winde und ein Vergleich mit Meßergebnissen.

Darstellung der Ergebnisse.

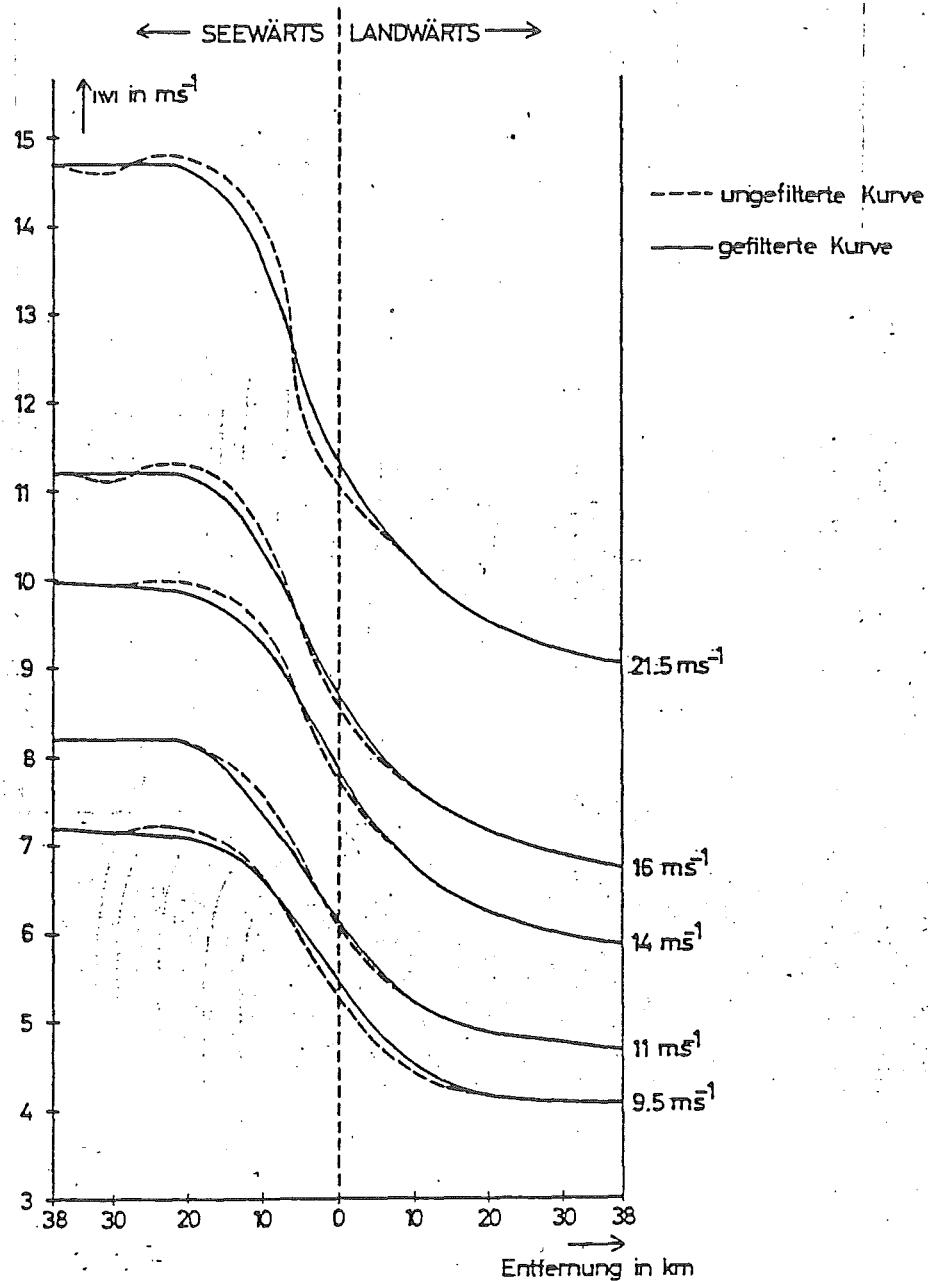


Abb. 5.4b: Die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zur Küstenlinie für verschiedene geostrophische Winde und ein Vergleich mit Meßergebnissen.

Wirkung des Filters nach Shuman (1958).

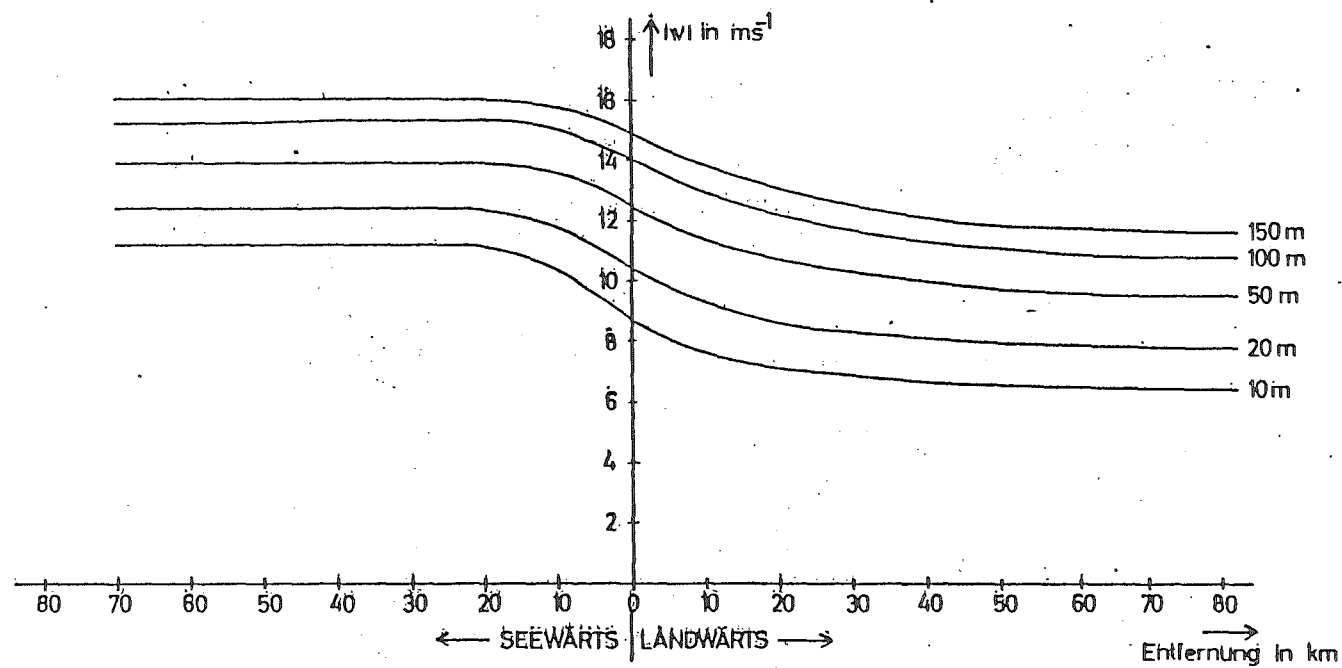


Abb. 5.5: Die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zur Küstenlinie für 16 ms^{-1} geostrophischen Wind für verschiedene Höhen.

9. Verzeichnis der Tabellen.

- Tab. 3.1: Mittlere Windverhältnisse in Marne -
Häufigkeitsverteilung in Prozent.
- Tab. 3.2: Kriterien zur Erfassung von Turbulenzdaten.
- Tab. 4.1: Der Exponent des Potenzgesetzes, p , im Tagesgang für die Höhen 10 m und 50 m des Modells und aus Meßwerten für Tating für die Höhen 12 m und 46 m.
- Tab. 5.1: Stationsübersicht.
- Tab. 5.2: Ergebnisse der statistischen Auswertung.
- Tab. 5.3: Der geostrophische Wind und aus der kumulativen Verteilung ausgewählte zugehörige Perzentilen für den Standort Tating.

STATION : MARNE

MESSHOEHE : 10M(1)WG, 50M(1)WR

ZEITRAUM : 17.10.-3.11.80

WINDGESCHWINDIGKEIT			HAEUFIGKEITEN IN PROZENT									
	REL.	CUH.	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
VON .5 BIS < 1 M/S	0.58	0.73	0.03	0.05	0.00	0.00	0.01	0.06	0.12	0.32		
VON 1 BIS < 2 M/S	5.39	6.12	0.10	1.76	1.22	0.59	0.11	0.10	0.72	0.79		
VON 2 BIS < 3 M/S	9.08	15.21	0.22	0.95	2.47	1.63	1.18	0.41	0.68	1.54		
VON 3 BIS < 4 M/S	11.99	27.19	0.57	0.22	4.08	1.56	2.28	0.73	0.82	1.73		
VON 4 BIS < 5 M/S	14.21	41.40	0.45	0.04	4.85	2.89	2.53	1.44	0.72	1.28		
VON 5 BIS < 6 M/S	12.02	53.42	0.40	0.00	1.91	1.62	4.40	2.26	0.66	0.76		
VON 6 BIS < 7 M/S	7.45	60.87	0.12	0.00	0.63	1.43	2.54	1.28	0.85	0.59		
VON 7 BIS < 8 M/S	4.58	65.45	0.06	0.00	0.44	0.77	0.78	1.04	0.80	0.69		
VON 8 BIS < 9 M/S	6.23	71.68	0.13	0.00	0.39	0.36	0.50	3.38	0.73	0.75		
VON 9 BIS < 10 M/S	8.81	80.49	0.07	0.00	0.21	0.04	0.02	6.43	0.96	1.09		
VON 10 BIS < 11 M/S	7.17	87.66	0.12	0.00	0.05	0.00	0.00	4.82	1.04	1.15		
VON 11 BIS < 12 M/S	4.24	91.89	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	2.67	0.53	0.98		
VON 12 BIS < 13 M/S	3.00	94.89	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	1.64	0.62	0.69		
VON 13 BIS < 14 M/S	2.28	97.18	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88	0.82	0.57		
VON 14 BIS < 15 M/S	1.69	98.86	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	0.85	0.35		
VON 15 BIS < 16 M/S	0.77	99.63	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.44	0.17		
VON 16 BIS < 17 M/S	0.31	99.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.08	0.09		
VON 17 BIS < 18 M/S	0.05	99.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02		
VON 18 BIS < 19 M/S	0.01	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00		
VON 19 BIS < 20 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 20 BIS < 21 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 21 BIS < 22 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 22 BIS < 23 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 23 BIS < 24 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 24 BIS < 25 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 25 BIS < 26 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 26 BIS < 27 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 27 BIS < 28 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 28 BIS < 29 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 29 BIS < 30 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
HAEUFIGKEIT EINER WINDRICHTUNG (%) :			2.42	3.01	16.24	10.89	14.36	27.93	11.45	13.55		
MITTL. GESCHW. EINER RICHTUNG (M/S) :			5.31	1.96	4.12	4.62	5.08	9.05	8.35	7.04		
WINDSTAERKEKLASSEN												
SCHWACHWINDIG (.5 BIS < 5 M/S)			56.73	100.00	77.69	61.29	42.57	9.83	26.72	41.76		
WINDIG (5 BIS < 10 M/S)			32.24	0.00	22.01	38.71	57.43	51.52	34.91	28.64		
STUERKISCH (10 BIS < 30 M/S)			11.02	0.00	0.30	0.00	0.00	38.65	38.36	29.59		
MITTLERE WINDGESCHWINDIGKEIT AN DER STATION.:			6.52 M/S	###	ANZAHL DER DATENSAETZE :					10127.		
HAEUFIGKEIT DER WINDSTILLEN (V < 0.5 M/S) :			0.15 %	###	ANZAHL DER EINZELDATEN :					10127.		

*** ALLE MESSUNGEN UEBER 30 M/S SIND IN DER LETZTEN GRUPPE ENTHALTEN ***

STATION : MARNE

MESSHOEHE : 50M(1)

ZEITRAUM : 17.10.-3.11.80

HAEUFIGKEITEN IN PROZENT												
WINDGESCHWINDIGKEIT	REL.	CUM.	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
VON .5 BIS < 1 M/S	0.16	0.18	0.03	0.00	0.00	0.09	0.00	0.01	0.03	0.00		
VON 1 BIS < 2 M/S	2.64	2.81	0.09	0.22	0.20	1.56	0.11	0.05	0.20	0.22		
VON 2 BIS < 3 M/S	6.89	9.71	0.07	0.25	0.32	5.21	0.48	0.15	0.16	0.26		
VON 3 BIS < 4 M/S	7.85	17.56	0.01	0.30	0.96	3.34	1.49	0.42	0.56	0.77		
VON 4 BIS < 5 M/S	10.40	27.95	0.18	2.18	2.51	0.66	2.16	0.41	0.81	1.48		
VON 5 BIS < 6 M/S	11.25	39.20	0.32	1.07	4.57	0.35	2.33	0.65	0.66	1.30		
VON 6 BIS < 7 M/S	11.71	50.91	0.11	0.01	5.95	0.13	2.22	1.36	0.45	1.47		
VON 7 BIS < 8 M/S	7.25	58.16	0.01	0.00	3.08	0.05	1.32	1.39	0.55	0.84		
VON 8 BIS < 9 M/S	5.12	63.28	0.09	0.00	2.12	0.09	0.11	0.93	1.00	0.78		
VON 9 BIS < 10 M/S	5.76	69.03	0.05	0.00	0.89	0.05	0.57	2.34	0.69	1.17		
VON 10 BIS < 11 M/S	7.15	76.18	0.15	0.00	0.39	0.03	0.94	4.19	0.23	1.23		
VON 11 BIS < 12 M/S	7.70	83.88	0.19	0.00	0.09	0.00	0.33	5.91	0.21	0.99		
VON 12 BIS < 13 M/S	5.14	89.03	0.30	0.00	0.02	0.00	0.26	3.41	0.46	0.70		
VON 13 BIS < 14 M/S	5.18	94.21	0.21	0.00	0.00	0.00	0.05	3.25	0.93	0.75		
VON 14 BIS < 15 M/S	3.41	97.62	0.18	0.00	0.00	0.00	0.03	1.90	0.85	0.45		
VON 15 BIS < 16 M/S	1.70	99.32	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	0.38	0.35		
VON 16 BIS < 17 M/S	0.59	99.91	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	0.11	0.12		
VON 17 BIS < 18 M/S	0.09	100.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03	0.01		
VON 18 BIS < 19 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 19 BIS < 20 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 20 BIS < 21 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 21 BIS < 22 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 22 BIS < 23 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 23 BIS < 24 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 24 BIS < 25 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 25 BIS < 26 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 26 BIS < 27 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 27 BIS < 28 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 28 BIS < 29 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
VON 29 BIS < 30 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
HAEUFIGKEIT EINER WINDRICHTUNG (%) :			2.08	4.02	21.09	11.55	12.40	27.64	8.30	12.89		
MITTL. GESCHW. EINER RICHTUNG (M/S) :			9.34	4.36	6.33	2.98	6.23	10.69	9.08	8.36		
WINDSTAERKEKLASSEN												
SCHWACHWINDIG (.5 BIS < 5 M/S)			18.01	73.22	18.87	94.02	34.24	3.79	21.17	21.15		
WINDIG (5 BIS < 10 M/S)			27.49	26.78	78.79	5.73	52.87	24.15	40.43	43.14		
STUERMISCH (10 BIS < 30 M/S)			54.50	0.00	2.34	0.26	12.90	72.06	38.41	35.71		
MITTLERE WINDGESCHWINDIGKEIT AN DER STATION :	7.66 M/S	***	ANZAHL DER DATENSAETZE :							10127.		
HAEUFIGKEIT DER WINDSTILLEN (V < 0.5 M/S) :	0.02 %	***	ANZAHL DER EINZELDATEN :							10127.		

*** ALLE MESSUNGEN UEBER 30 M/S SIND IN DER LETZTEN GRUPPE ENTHALTEN ***

Tab. 3.1c: MITTLERE WINDVERHAELTNISSE

- 240

STATION : MARNE

MESSHOEHE : 100M(1)

ZEITRAUM : 17.10.-3.11.81

I WINDGESCHWINDIGKEIT I H A E U F I G K E I T E N I N P R O Z E N T I												
I	I	REL.	CUM.	I	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
I VON .5 BIS < 1 M/S	I	0.56	0.86	I	0.05	0.02	0.18	0.27	0.02	0.00	0.00	0.03
I VON 1 BIS < 2 M/S	I	1.60	2.46	I	0.20	0.10	0.26	0.83	0.01	0.01	0.09	0.11
I VON 2 BIS < 3 M/S	I	1.77	4.23	I	0.00	0.08	0.20	0.90	0.01	0.06	0.25	0.28
I VON 3 BIS < 4 M/S	I	3.89	8.12	I	0.00	0.00	0.37	2.72	0.23	0.16	0.30	0.13
I VON 4 BIS < 5 M/S	I	4.80	12.92	I	0.00	0.00	0.22	1.94	0.80	0.57	0.76	0.51
I VON 5 BIS < 6 M/S	I	6.11	19.03	I	0.00	0.38	1.13	1.39	1.49	0.36	0.85	0.52
I VON 6 BIS < 7 M/S	I	8.19	27.21	I	0.01	0.62	2.76	0.93	1.69	0.41	0.66	1.11
I VON 7 BIS < 8 M/S	I	7.84	35.05	I	0.01	0.69	2.43	0.69	1.65	0.92	0.51	0.94
I VON 8 BIS < 9 M/S	I	9.63	44.68	I	0.18	0.67	3.14	0.32	2.05	1.26	0.86	1.15
I VON 9 BIS < 10 M/S	I	10.07	54.75	I	0.04	0.29	5.44	0.24	1.89	1.29	0.46	0.42
I VON 10 BIS < 11 M/S	I	5.97	60.73	I	0.02	0.00	3.58	0.11	0.28	0.88	0.64	0.46
I VON 11 BIS < 12 M/S	I	4.93	65.66	I	0.03	0.00	1.45	0.04	0.15	1.76	0.72	0.78
I VON 12 BIS < 13 M/S	I	6.01	71.67	I	0.04	0.00	0.86	0.01	0.91	2.75	0.64	0.81
I VON 13 BIS < 14 M/S	I	5.66	77.33	I	0.04	0.00	0.16	0.00	0.93	2.97	0.31	1.25
I VON 14 BIS < 15 M/S	I	6.45	83.78	I	0.05	0.00	0.02	0.00	0.66	4.69	0.19	0.84
I VON 15 BIS < 16 M/S	I	4.33	88.10	I	0.09	0.00	0.00	0.00	0.19	2.85	0.39	0.80
I VON 16 BIS < 17 M/S	I	3.80	91.90	I	0.06	0.00	0.00	0.00	0.08	2.26	0.62	0.78
I VON 17 BIS < 18 M/S	I	4.33	96.23	I	0.09	0.00	0.00	0.00	0.05	2.98	0.78	0.52
I VON 18 BIS < 19 M/S	I	2.24	98.47	I	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	1.43	0.38	0.39
I VON 19 BIS < 20 M/S	I	1.11	99.58	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	0.06	0.26
I VON 20 BIS < 21 M/S	I	0.39	99.96	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.24	0.04	0.10
I VON 21 BIS < 22 M/S	I	0.04	100.00	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01
I VON 22 BIS < 23 M/S	I	0.00	100.00	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
I VON 23 BIS < 24 M/S	I	0.00	100.00	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
I VON 24 BIS < 25 M/S	I	0.00	100.00	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
I VON 25 BIS < 26 M/S	I	0.00	100.00	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
I VON 26 BIS < 27 M/S	I	0.00	100.00	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
I VON 27 BIS < 28 M/S	I	0.00	100.00	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
I VON 28 BIS < 29 M/S	I	0.00	100.00	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
I VON 29 BIS < 30 M/S	I	0.00	100.00	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
I												
I												
I H A E U F I G K E I T E I N E R W I N D R I C H T U N G (%) : 0.92 2.84 22.18 10.37 13.10 28.57 9.52 12.20												
I												
I												
I M I T T L . G E S C H W . E I N E R R I C H T U N G (M / S) : 9.63 6.99 8.57 4.52 8.75 13.56 10.33 11.14												
I												
I W I N D S T A E R K E K L A S S E N												
I S C H W A C H W I N D I G (. 5 B I S < 5 M / S) 26.88 6.94 5.48 64.10 8.14 2.80 14.63 8.66												
I W I N D I G (5 B I S < 10 M / S) 25.81 93.06 67.14 34.38 66.92 14.86 35.17 33.90												
I S T U E R M I S C H (10 B I S < 30 M / S) 47.31 0.00 27.38 1.52 24.94 82.34 50.21 57.44												
I												
I M I T T L E R E W I N D G E S C H W I N D I G K E I T A N D E R S T A T I O N : 10.02 M/S ### A N Z A H L D E R D A T E N S A E T Z E : 10127.												
I H A E U F I G K E I T D E R W I N D S T I L L E N (V < 0.5 M / S) : 0.30 % ### A N Z A H L D E R E I N Z E L D A T E N : 10127.												
I												

ALLE MESSUNGEN UEBER 30 M/S SIND IN DER LETZTEN GRUPPE ENTHALTEN

STATION : MARNE

MESSHOEHE : 150 M

ZEITRAUM : 17.10.-3.11.81

WINDGESCHWINDIGKEIT		HAEUFIGKEITEN IN PROZENT									
	REL.	CUM.	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
VON .5 BIS < 1 M/S	0.23	0.71	0.02	0.00	0.07	0.01	0.03	0.00	0.00	0.10	
VON 1 BIS < 2 M/S	0.60	1.31	0.10	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	0.03	0.27	
VON 2 BIS < 3 M/S	0.66	1.97	0.10	0.00	0.17	0.06	0.00	0.00	0.08	0.26	
VON 3 BIS < 4 M/S	1.75	3.72	0.09	0.00	0.58	0.09	0.50	0.05	0.19	0.25	
VON 4 BIS < 5 M/S	2.97	6.69	0.14	0.02	0.17	0.49	0.88	0.28	0.49	0.50	
VON 5 BIS < 6 M/S	4.85	11.54	0.19	0.47	0.39	0.70	0.70	0.94	0.51	0.94	
VON 6 BIS < 7 M/S	7.18	18.72	0.19	0.40	2.32	0.07	0.98	1.63	0.52	1.07	
VON 7 BIS < 8 M/S	7.61	26.34	0.18	0.86	2.72	0.00	1.22	1.28	0.24	1.12	
VON 8 BIS < 9 M/S	10.10	36.44	0.23	0.36	2.97	0.00	2.42	2.09	0.35	1.69	
VON 9 BIS < 10 M/S	14.76	51.20	0.42	0.27	5.85	0.00	4.55	2.04	0.48	1.15	
VON 10 BIS < 11 M/S	9.03	60.23	0.11	0.07	4.36	0.00	1.99	0.85	0.77	0.87	
VON 11 BIS < 12 M/S	5.45	65.68	0.05	0.04	1.47	0.00	0.49	1.51	0.88	1.01	
VON 12 BIS < 13 M/S	6.17	71.85	0.04	0.00	0.53	0.00	0.04	3.55	0.78	1.22	
VON 13 BIS < 14 M/S	7.12	78.97	0.04	0.00	0.03	0.00	0.04	4.82	0.76	1.43	
VON 14 BIS < 15 M/S	5.85	84.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	4.27	0.61	0.95	
VON 15 BIS < 16 M/S	4.19	89.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	2.34	0.85	0.93	
VON 16 BIS < 17 M/S	2.98	91.98	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.94	1.29	0.73	
VON 17 BIS < 18 M/S	4.64	96.62	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	2.43	0.69	
VON 18 BIS < 19 M/S	2.32	98.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.18	0.75	0.39	
VON 19 BIS < 20 M/S	0.83	99.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.34	0.19	
VON 20 BIS < 21 M/S	0.19	99.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.09	0.07	
VON 21 BIS < 22 M/S	0.04	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	
VON 22 BIS < 23 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
VON 23 BIS < 24 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
VON 24 BIS < 25 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
VON 25 BIS < 26 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
VON 26 BIS < 27 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
VON 27 BIS < 28 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
VON 28 BIS < 29 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
VON 29 BIS < 30 M/S	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
HAEUFIGKEIT EINER WINDRICHTUNG (%) :			1.99	2.49	21.84	1.42	13.87	29.61	12.47	15.81	
MITTL. GESCHW. EINER RICHTUNG (M/S) :			7.66	7.39	8.73	4.88	8.37	12.39	13.23	10.70	
WINDSTAERKEKLASSEN											
SCHWACHWINDIG (.5 BIS < 5 M/S)			22.28	0.79	5.47	45.83	10.18	1.10	6.33	8.68	
WINDIG (5 BIS < 10 M/S)			60.40	94.84	65.24	54.17	71.17	26.98	16.86	37.66	
STUERMISCH (10 BIS < 30 M/S)			17.33	4.37	29.29	0.00	18.65	71.92	76.80	53.65	
MITTLERE WINDGESCHWINDIGKEIT AN DER STATION :			10.48 M/S	###	ANZAHL DER DATENSAETZE :				10127.		
HAEUFIGKEIT DER WINDSTILLEN (V < 0.5 M/S) :			0.48 %	###	ANZAHL DER EINZELDATEN :				10127.		

ALLE MESSUNGEN UEBER 30 M/S SIND IN DER LETZTEN GRUPPE ENTHALTEN

Tab. 3.2: Kriterien zur Erfassung von Turbulenzdaten.

Windgeschwindigkeit: u in ms^{-1}

Stabilitätsklasse: SK: stabil, leicht stabil, neutral
leicht labil, labil

SK ^u	0-5	5-8	8-12	12-16	16-24	24
st.	1h	1h	-	-	-	-
l.St.	1h	4h	4h	4h	} 8h	-
n.	2h	8h	8h	8h		alles
l.la.	1h	4h	4h	4h		-
la.	1h	1h	-	-	-	-

Schauer- und Gewitterböen: soviel wie möglich!

Tab. 4.1: Der Exponent des Potenzgesetzes, p , im Tagesgang für die Höhen 10 m und 50 m des Modells und aus Meßwerten für Tating für die Höhen 12 m und 46 m.

Uhrzeit (ca.)	7.30	9.30	11.30	13.30	15.30	17.30
Modell	0.21	0.19	0.19	0.19	0.20	0.22
November 79	0.21	0.18	0.15	0.13	0.17	0.24
Dezember 79	0.27	0.25	0.22	0.21	0.21	0.23
März 80	0.26	0.18	0.16	0.16	0.16	0.23

Tab. 5.1: Stationsübersicht.

Station	Höhe der Anemometer	Abstand zur Küste	Rauhigkeits- parameter z_0
Feuerschiff "P8"	18m	68km	0.0002m
Feuerschiff "P12"	18m	32km	0.0002m
Feuerschiff "Elbe 1"	20m	42km	0.0002m
Feuerschiff "Weser"	18m	13km	0.0002m
Norderney	28m	11km	0.15m
Bremerhaven	10m	35 (13) km	---
Emden	10m	35 km	---
Bremen	10m	82 km	---

Tab. 5.2: Ergebnisse der statistischen Auswertung.

Wind- geschw. in kn	P8		Weser		Elbe 1		P12		Norder- ney		Bremer- haven		Emden		Bremen	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
5																
6															4	4
7															2	6
8											3	3	3	9	4	10
9	2	2			1	1	2	2	1	1	3	3	5	14	5	15
10		2				1		2	1	2	9	12	8	22	15	30
11	1	3	3	3	3	4		2	1	3	5	17	3	25	8	38
12	2	5		3	1	5	2	4	2	5	3	20	8	33	11	49
13	1	6	1	4	2	7	3	7	1	6	2	22	6	39	5	54
14		6	5	9	2	9	1	8	3	9	9	31	8	47	3	57
15	4	10	1	10	1	10	4	12	2	11	4	35	8	55	8	65
16	1	11	2	12	2	12	2	14	2	13	8	43	7	62	2	67
17	3	14	2	14	3	15		14	1	14	3	46	1	63	4	71
18	5	19	3	17		15	2	16	3	17	8	54	4	67		71
19	2	21	5	22	3	18	2	18	4	21	7	61		67	3	74
20	4	25	4	26	2	20	8	26	2	23	2	63	1	68	1	75
21	4	29	5	31	4	24	4	30	6	29	3	66	2	70		
22	3	32	7	38	6	30	6	36	3	32	2	68	2	72		
23	6	38	7	45	8	38	4	40	7	39		68		72		
24	1	39	9	54	9	47	6	46	8	47	1	69	1	73		
25	8	47	3	57	5	52	8	54	3	50	1	70	1	74		
26	5	52	1	58	6	58	4	58	4	54	2	72		74		
27	3	55	3	61	6	64		58	4	58	2	74		74		
28	7	62	5	66	3	67	3	61	4	62	1	75		74		
29	4	66	2	68	1	68	3	64	5	67				74		
30	1	67	2	70	4	72	3	67	1	68			1	75		
31	1	68	2	72	1	73	1	68		68						
32	2	70	1	73	1	74	2	70	3	71						
33		70	1	74		74	2	72	2	73						
34		70		74	1	75	1	73		73						
35	1	71	1	75				73		73						
36		71						73		73						
37	2	73					1	74		73						
38	1	74						74	2	75						
39	1	75						74								
40							1	75								
Summe	75		75		75		75		75		75		75		75	
Median- schätzung	23.4		22.4		23.4		22.9		23.3		15.8		13.3		11.4	
auf 10m reduziert	22.2		21.2		22.0		21.7		19.9		15.5		13.3		11.4	

X:Anzahl der Fälle je Geschwindigkeitsklasse
Y:Kumulative Häufigkeit

Tab. 5.3: Der geostrophische Wind und aus der kumulativen Verteilung ausgewählte zugehörige Perzentilen für den Standort Tating.

geostrophischer Wind	Percentile
6.0m/s	25 %
9.5m/s	50 %
11.0m/s	60 %
14.0m/s	75 %
16.0m/s	83 %
21.5m/s	95 %

Die große Windkraftanlage und ihre
Forderung an die Windmessung

F. Körber, MAN AG - Neue Technologie

1. ÜBERSICHT

Naturgemäß spielt der Wind bei der Auslegung, Berechnung und Konstruktion einer Windkraftanlage eine gravierende Rolle. Es kommt daher seiner windkraftspezifischen Messung insbesondere bei großen Windturbinen, an die erhöhten Anforderungen an Betriebssicherheit und Leistungsfähigkeit gestellt werden müssen, vermehrte Bedeutung zu. Drei Bereiche können unterschieden werden, in denen die Winddaten als Eingangsgrößen dienen müssen:

- Energieproduktion und -anfall, Leistung
- Belastung
- Betriebsführung

Das erste Thema wird man zum Teil mit bekannten langjährigen Jahresmittelnwerten bearbeiten können. Aus der Beziehung für die Höhenwindverteilung ist dies auch möglich, wenn nur der in 10 m Höhe gemessene Standardwert bekannt ist. Schwieriger wird es schon, wenn nach dem Energieanfall innerhalb eines Jahres oder gar eines Tages gefragt ist. Neben diesen Fragen nach der Energieproduktion der Anlage interessiert den Ingenieur der Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Leistung seiner Windturbine, denn er gibt Auskunft, wie gut die Umwandlung der kinetischen Strömungsenergie in mechanische oder elektrische Energie funktioniert. Hierzu ist notwendig, entsprechende Meßwertpaare von Windgeschwindigkeit und Leistung in kurzen Zeitintervallen von Minuten und Sekunden aufzunehmen, um zum Beispiel das C_p - λ - Kennfeld eines Blattprofils zu erhalten.

Die Belastungen eines Windrades lassen sich in einen statischen (oder quasi-statischen) und einen stochastischen Teil aufspalten. Der statische Teil der sich aus den Massenkräften ableitet, ist leicht faßbar. Der veränderliche Teil kommt aus örtlichen und zeitlichen Variationen des Windvektors und führt zu erheblichen Zusatzbelastungen, die durch dynamische Anregungen aus der Windströmung noch verschärft werden können. Derartige Anregungen sind beispielsweise Böen, der Windgeschwindigkeitsunterschied zwischen oberster und unterster Stellung des Rotorblattes oder der Blattdurchgang durch den Turmwindschatten. Bei einer Rotordrehzahl von $18,5 \text{ min}^{-1}$ bei GROWIAN und

Systemeigenfrequenzen im Bereich von 0,5 bis zu einigen Hz bedeutet das Windmessungen über Sekundenbruchteile. Meßwerte für diese für die herkömmliche meteorologische Fragestellung sehr kurze Zeitdauer sind nur sehr spärlich in der Literatur vorhanden. Da die Ausdehnung der bestrichenen Rotorfläche von rund 8000 m² (das ist ungefähr das Areal eines Fußballspielfeldes) es nicht mehr erlaubt, die Strömung als gleichmäßig über der ganzen Fläche zu betrachten, müssen flächige Messungen mit Punktabständen von ca. 25 m gemacht werden. Dieses Maß wird als relevant für Turbulenzen angesehen, die ein Rotorblatt von GROWIAN „sehen“ wird.

Für die Betriebsführung einer Windkraftanlage sind ebenfalls speziell die kurzfristigen Variationen des Windvektors in Betrag und Richtung interessant. Es stellt sich hier die Frage, welche Ansprechschwellen man setzt, bei denen ein Regelvorgang ausgelöst wird. Das eine Extrem der sofortigen Reaktion führt zu einem ständigen Arbeiten der Regelglieder, damit zu hohem Verschleiß und auch Energieverbrauch. Der andere Grenzfall sehr großer Trägheit verursacht unter Umständen einen Leistungsverlust oder kann die Gesamtanlage bei verspäteter Reaktion auf die geänderten Windverhältnisse in Gefahr bringen. Auch die Fragen aus dem Themenkreis der Betriebsführung verlangen also überwiegend Messungen im Sekundenbereich und Aussagen zur Windverteilung über der Rotorfläche.

2. SPEZIELLE WINDFRAGEN DES GROWIAN-MESSPROGRAMMS

In Bild 2 ist die geographische Situation am GROWIAN-Standort dargestellt. Die Windkraftanlage steht rund 1600 m in Hauptwindrichtung WSW hinter dem Deich im Kaiser-Wilhelm-Koog.

2.1 Ungestörte Strömung

Man nimmt an, daß der Rotor einer Windturbine ungefähr 5 Rotordurchmesser stromauf Einfluß auf die Windströmung nimmt. Für eine Messung des ungestörten Zustandes sind daher bei GROWIAN 500 m Abstand von der Anlage einzuhalten(Bild 3). An dieser Meßstelle, an der ein bereits vorhandener Windmeßturm 1 steht, sollen Langzeitwerte des Energieangebots nach Betrag und Richtung und die Höhenverteilung der Windgeschwindigkeit gemessen werden. Des weiteren werden hier meteorologische Standardmessungen zum Zustand der Atmosphäre (Temperatur, Feuchte, Luftdruck, Globalstrahlung etc.) vorgenommen.

2.2 Zustrom zur Rotorfläche

Ein Schwerpunkt der Windmessung liegt auf der Klärung der flächigen Zustromverhältnisse zum Rotor. Für die Lastfalldefinition mußten verschiedene Modelle von Windstrukturen entwickelt werden, die es zu überprüfen gilt. Zu diesem Zweck wird vor dem Rotor ein Windmeßgitter aufgebaut, das seinerseits nur möglichst geringen Einfluß auf die Luftströmung nehmen darf. Die unmittelbare Nähe zum Rotor ist notwendig, um die Aktion des Windes und die Reaktion der Anlage zueinander in Beziehung setzen zu können. Die Untersuchungen werden dann durchgeführt, wenn die Hauptwindrichtung WSW vorherrscht. Da es sich bei den Messungen am Gitter um Kurzzeitmessungen handelt, reichen die zu erwartenden Betriebszeiten mit der Hauptwindrichtung aus.

Die Position des Meßgitters ist im Bild 3 nahe GROWIAN zu sehen. In Windrichtung betrachtet sind die Meßstellen wie in Bild 4 gezeigt verteilt. Um schnelle Windvariationen erfassen zu können, werden Propeller- Anemometer mit kleiner Trägheitslänge eingesetzt. Eine räumliche Anschauung der Windsituation gibt Bild 5; Einer Grundwindgeschwindigkeit sind Geschwindigkeitsänderungen in den drei Raumrichtungen überlagert.

2.2.1 Zeitcharakteristik von Böen

Neben Bremsvorgängen und extremen Stillstandsbeanspruchungen sind Belastungen aus Böenfällen für GROWIAN dimensionierend. Dies trifft insbesondere auf die Rotorblätter zu. In den Lastfällen wurden die Modellböen des Bilds 6 definiert. Es handelt sich dabei um Positiv- und Negativböen im Windgeschwindigkeitsbereich bis 24 m/s, Positivextremböen bis 40 m/s und eine Negativextrembö bei 30 m/s. Die Böenvorderflanken und Rückseiten wurden mit verschiedenen Geschwindigkeitsgradienten angenommen, die je nach Fall zwischen 1,5 und 8 m/s² liegen. Die konstante Phase der Maximalgeschwindigkeit wurde jeweils mit 0,5 s angenommen. Für die Festigkeits- und Lebensdauerberechnungen mußten zusätzlich Annahmen über die Anzahl der Lastwechsel in den jeweiligen Lastfällen während einer Anlagenlebensdauer von 20 Jahren gemacht werden.

Winduntersuchungen zu vorstehenden Annahmen stehen im Mittelpunkt der Kurzzeitmessungen am Windmeßgitter der Masten 2 + 3, da bisherige Arbeiten zu diesem Thema ungenügende oder keine Aussagen machen. Für die Dimensionierung insbesondere großer Rotorblätter sind derartige Daten nach augenblicklicher Meinung aber unerlässlich. Ebenfalls fehlen Angaben über die Häufigkeit der einzelnen Böentypen und unter Umständen zyklisches Auftreten von Böen. Auch solche kleineren Geschwindigkeitshubs können verheerende Folgen nach sich ziehen, wenn sie für einen mehr oder minder langen Zeitraum zyklisch auftreten und frequenzkonform mit Eigenschwingungen von Anlagenkomponenten oder der Gesamtanlage liegen.

2.2.2 Räumliche Ausdehnung von Böen

Das Vorhandensein von Böen muß nicht zwangsläufig einen Angriff auf eine Windturbine bedeuten. Ein ausschlaggebender Parameter wird die räumliche Ausdehnung der Bö sein. Kleine Böenkörper von 10 oder 15 m Durchmesser der walzen- oder eiförmigen Form werden ein Rotorblatt von 50 m Länge nicht beeindrucken. Halbe oder ganze Rotorblattlänge als Maß für die Bö dürfte dagegen nicht zu vernachlässigen sein.

2.2.3 Windgeschwindigkeitsschwankung und Regelung

Eine Entschärfung von Böen könnte in gewisser Weise dadurch geschehen, daß die Windturbine den Windgeschwindigkeitsschwankungen ausweicht. Die Konstruktion der Pendelnabe bringt diese Möglichkeit durch pendelwinkelabhängige Steuerung der Blatteinstellwinkel mit. Neben dieser mechanisch starren Koppelung der beiden Blätter wäre auch eine messende und aktive Steuerung der Blätter denkbar.

Die Böenmessungen sollen daher auch zu diesen Konstruktionen Eingangsinformationen bringen.

2.2.4 Aktion - Reaktion

Die Untersuchungen zu den Abschnitten 2.2 ff könnten zum Teil separat von der Windenergieanlage durchgeführt werden. Von großem Interesse ist aber nicht nur das Phänomen der Windaktion selbst, sondern vielmehr die Reaktion der Anlage, im vorliegenden Fall von GROWIAN. Dieses Interesse ist auch der Grund für den Aufbau der Windmeßmaste 2 + 3 in unmittelbarer Anlagennähe. In der Annahme, durch die kurze Windlaufzeit zwischen Meßgitter und GROWIAN vernünftige Korrelationen zwischen Wind und Anlagenverhalten zu erhalten, wurde eine etwaige geringfügige Beeinflussung der Windströmung durch das Mastsystem in Kauf genommen.

2.2.5 Aufgaben der Böenmessungen

Die Böenproblematik für eine Windkraftanlage der Dimension GROWIAN wurde umstehend dargestellt. Daraus leiten sich grob die Aufgaben von windkraftspezifischen Kurzzeitmessungen ab:

- Welche Parameter einer Böe (Basis-, Maximalgeschwindigkeit, Geschwindigkeitsgradienten, Gesamtdauer etc.) sind für eine Windkraftanlage überhaupt relevant ?
- Wie groß sind diese Parameter ?

- Wie groß ist die Häufigkeit des Auftretens, die Möglichkeit einer zyklischen Böenfolge ?
- Wie stellt sich Windaktion und Anlagenreaktion dar ?

2.3 Abstrom der Anlage

Die Linie von Meßgeräten an Turm 1, Mast 2 + 3, GROWIAN ermöglicht es bei gegenüber der Hauptwindrichtung WSW um 180 ° gedrehtem Wind den Nachlauf des Rotors zu vermessen. Hieraus sollen Erkenntnisse gewonnen werden, die für die Planung von Windkraftparks dienlich sein können.

2.4 Winddruckverteilung und Windschatten des Turms

Die Steifigkeit des GROWIAN Turmsystems mit hohen Abspannkräften der Seile läßt eine Anregung des Turmschafts durch Ablösung von Wirbeln nicht als gefährlich erscheinen. Dennoch sollen eine Reihe von Druckmeßbohrungen in verschiedenen Höhen in der Turmwand vorgesehen werden. Dies geschieht auch im Zusammenhang mit der Vermessung des Turmwindschattens, der in die Dynamik wie in die Leistung des Rotors eingeht. Es ist geplant, das Gebiet des Turmwindschattens mit Hilfe eines Auslegers punktweise abzufahren und zu vermessen. Inwieweit das bei den instationären Strömungszuständen im Lee des Turmschafts möglich ist, muß in Vorversuchen festgestellt werden.

Im Bild 7 ist abschließend der Meßort, die Meßaufgabe und das Meßgerät für die Windmessungen zusammengestellt.

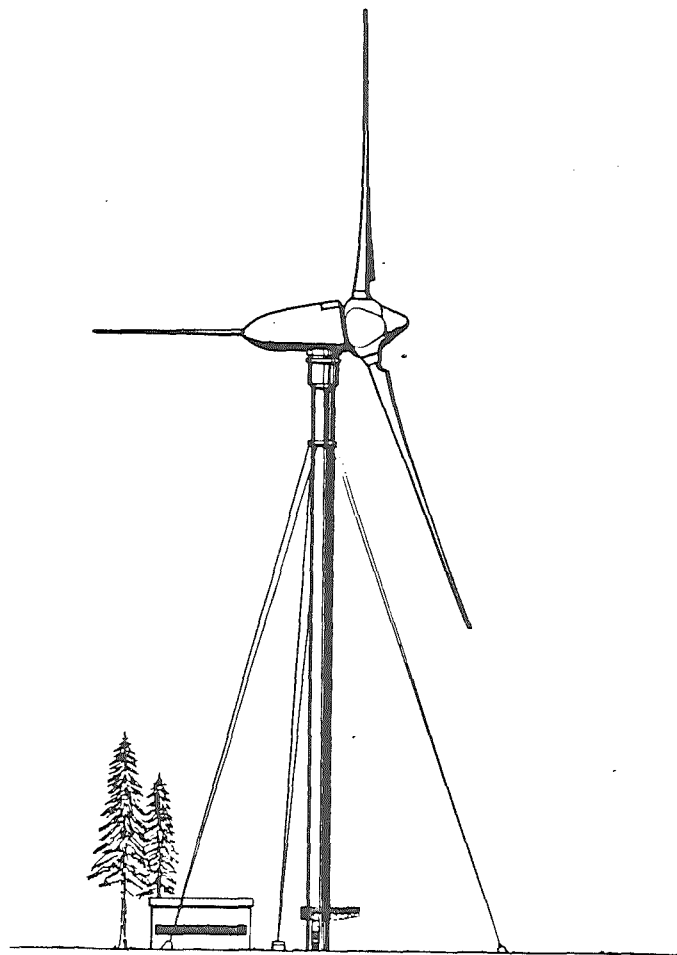


Bild 1: Große Windenergieanlage GROWIAN

Leistung

– Nennleistung	3 MW
– Mittlere Jahresenergie	12 GWh
– Spezifische Flächenleistung	380 W/m ²

Wind

– Nenngeschwindigkeit	11,8 m/s
– Anfahrgeschwindigkeit	6,3 m/s
– Abschaltgeschwindigkeit	24 m/s
– Max. Auslegungsgeschw.	60 m/s

Maße

– Rotordurchmesser	100,4 m
– Rotordrehzahl	18,5 min ⁻¹ ± 15%
– Nabenhöhe über Grund	100 m
– Turmkopfmasse mit Rotor	324 t

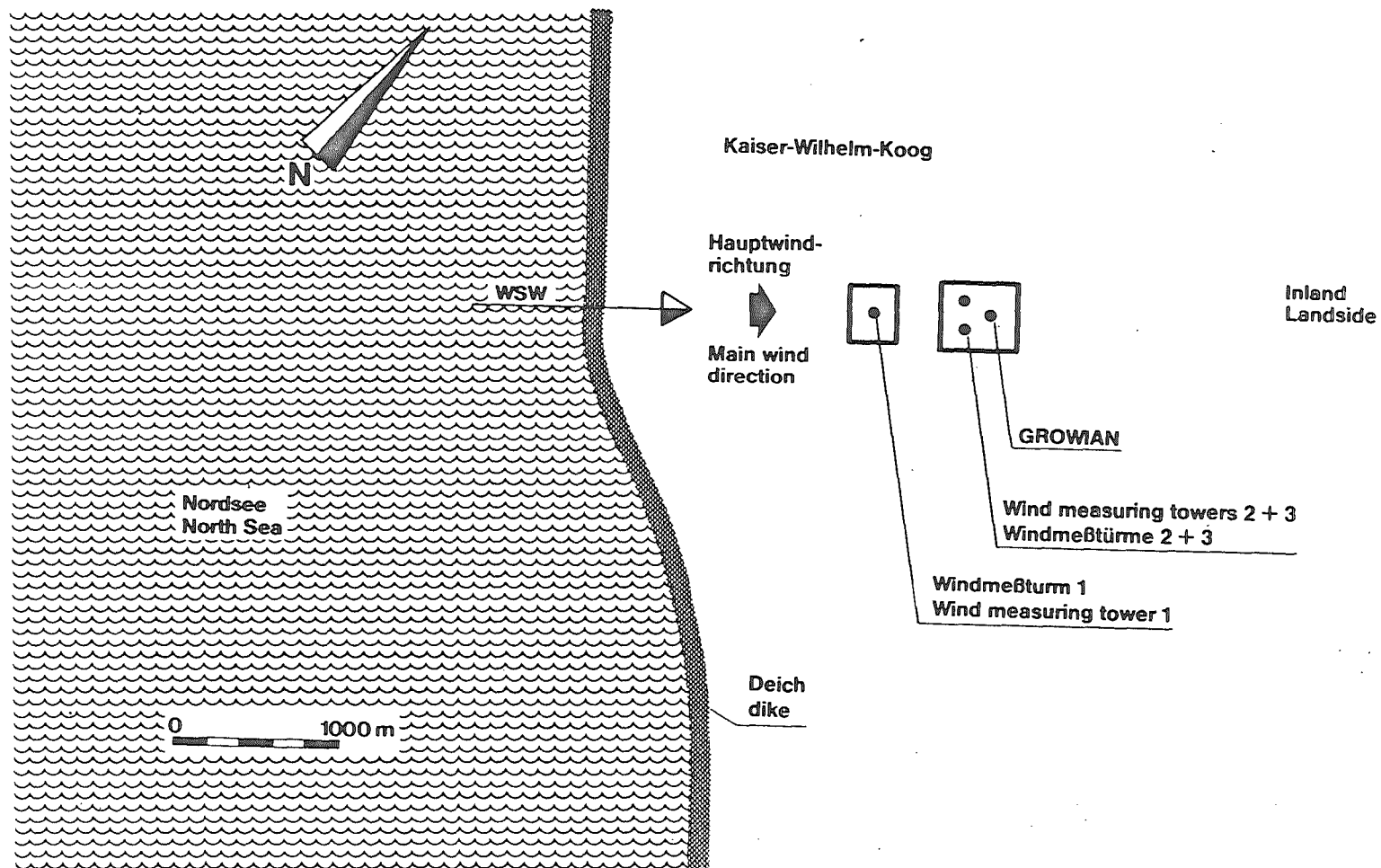
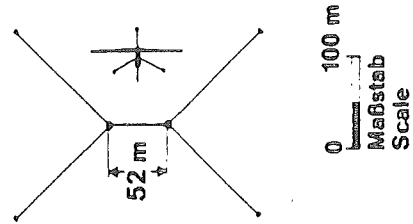
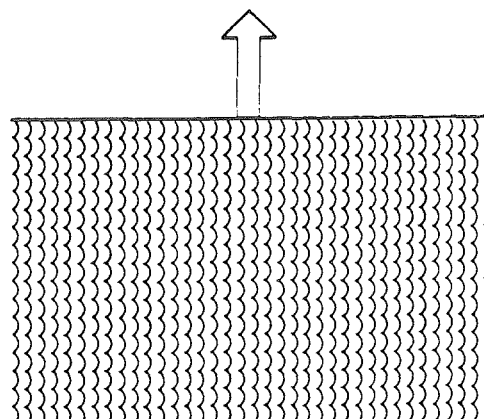
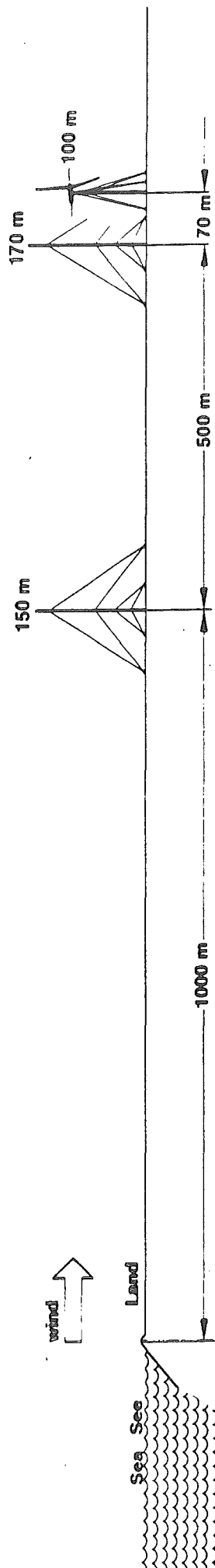


Bild 2:

Geographische Lage Geographic Situation



Seitenansicht und Grundriß
Side view and Ground Plan

Bild 3:

0 100 m
 Maßstab
 Scale

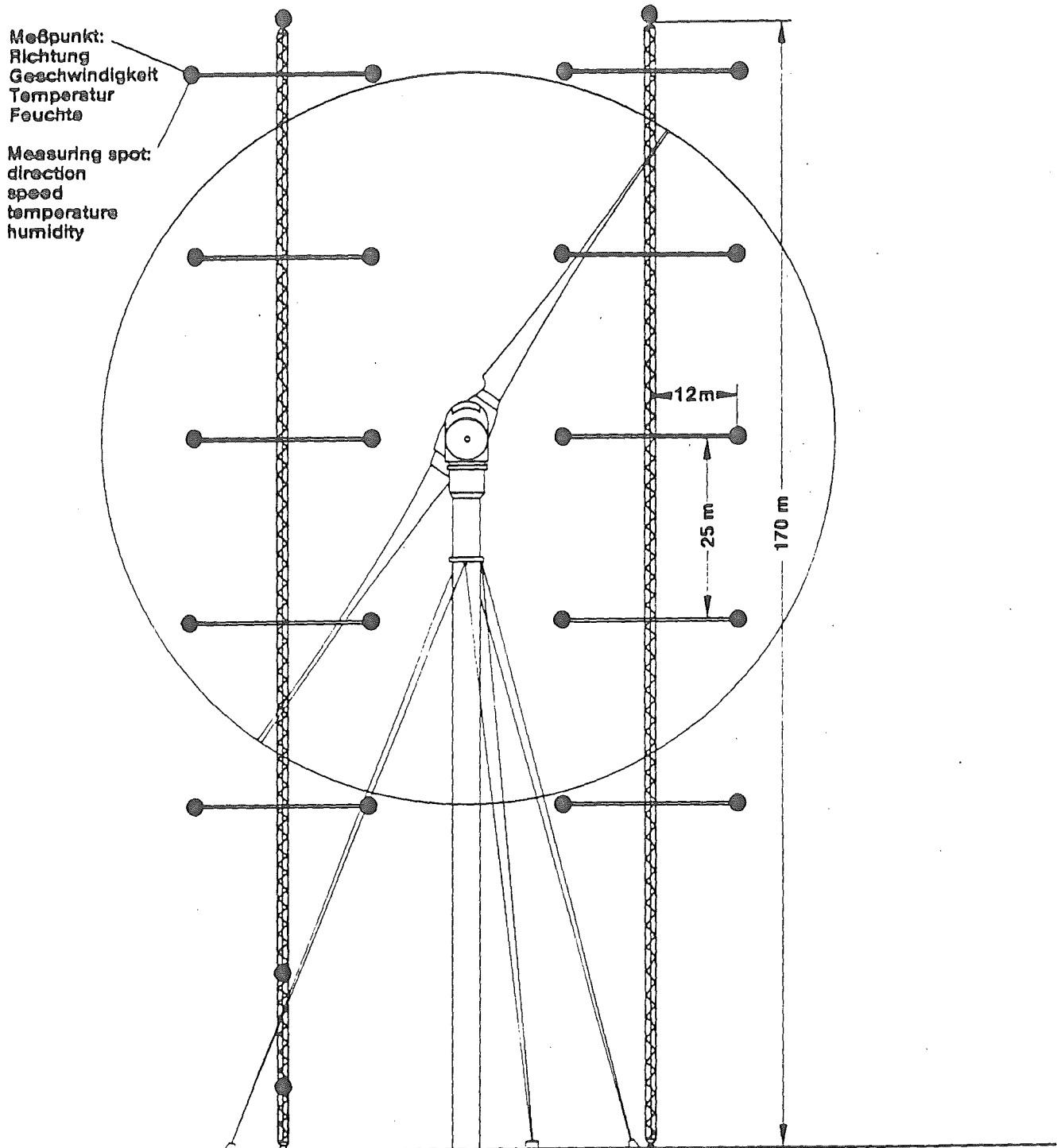


Bild 4:

Windmeßgitter Wind Measuring Arrangement

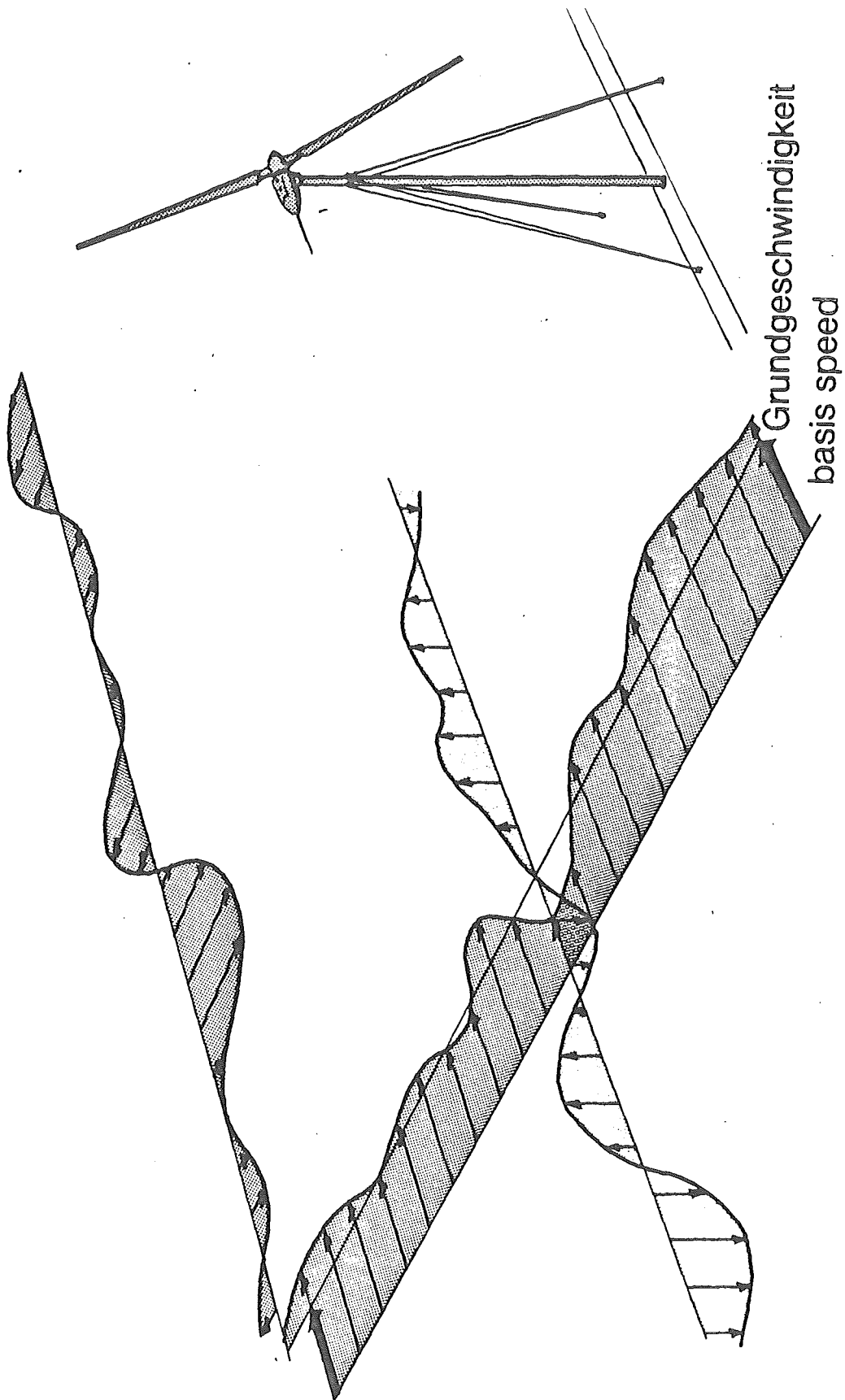
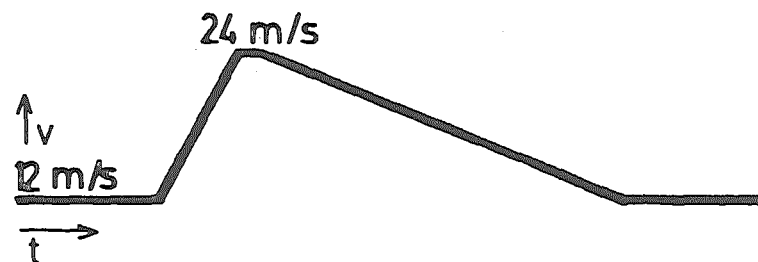


Bild 5:

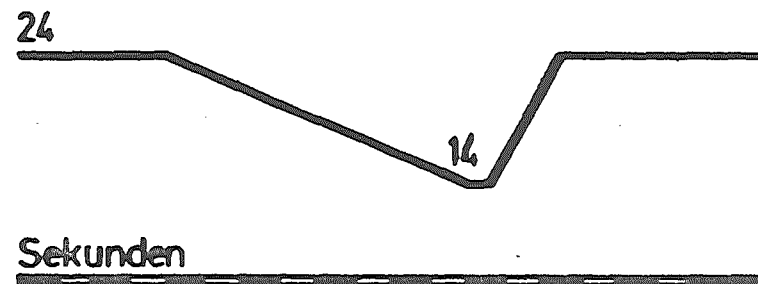
Dreidimensionale Turbulenz Three-dimensional Turbulence

POSITIVBÖ



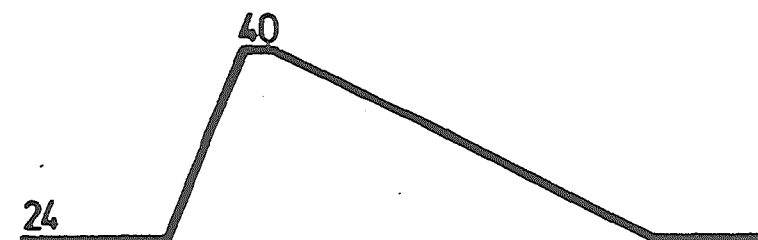
10000 Lastwechsel
in 20 Jahren

NEGATIVBÖ



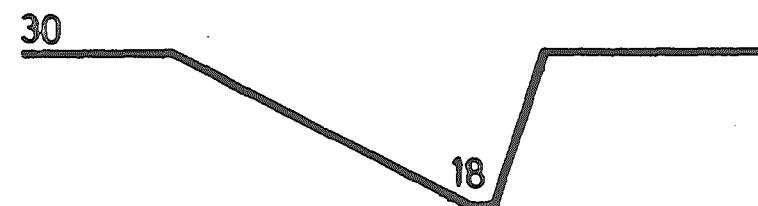
10000

POSITIV -
EXTREMBÖ



50

NEGATIV -
EXTREMBÖ



50

Bild 6: Lastfall Böen

Ort: Turm 1
570 m stromauf

Meßhöhe 10 m 50 m 100 m 150 m

1-Komponenten-Anemometer, Thermometer, Strahlungsmesser

Aufgabe: ungestörte Strömung, Höhenverteilung, Energieangebot

Masten 2 + 3
70 m stromauf

Meßhöhe 10 m 25 m 50 m 75 m 100 m 125 m 150 m

3-Komponenten-Anemometer, Thermometer, Feuchtemesser
über Rotorquerschnitt flächig verteilt.

Aufgabe: Zustrom zur Rotorfläche, flächige und zeitliche
Verteilung des Windvektors, Änderungen zwischen 1 und 2 + 3,
Rotoraufstau, Rotornachlauf, Lastannahmen

GROWIAN

Meßhöhe 17 m 40 m 63 m 86 m Sporn Dach
Druckmeßbohrungen Turm, Anemometer

Aufgabe: Turmumströmung, Turmschatten, Rotoranströmung

Bild 7:

Windmessungen

Programm Energieforschung und Energietechnologien 1977-1980

Auszug-

Jahresbericht 1980 über Rationelle Energieverwendung Fossile Primärenergieträger Neue Energiequellen

vorgelegt von der

Projektleitung Energieforschung (PLE) · KFA Jülich

im Auftrage des

Bundesministers für Forschung und Technologie
und des Bundesministers für Wirtschaft

Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland		Programm-Nr.: 3.3.1.1.7
Programm-Schwerpunkt: Neue Energiequellen		Gebiet: Windenergie Große Windanlagen und Speicher
Projekt: Die Windverhältnisse im Küstenvorfeld der Bundesrepublik Deutschland im Hinblick auf die Windkraftnutzung (insbesondere Verbundnetzplanung)		
Laufzeit: 01.07.1979 - 31.12.1980		Projekt-Nr.: 3-ET 1413 A
Durchführung: Deutscher Wetterdienst - Seewetteramt - Bernhard-Nocht-Str. 76 2000 Hamburg 4 Verantwortl.-Leiter: Dr. G. Duensing		Unterauftragnehmer:
Projektbeschreibung: <u>1. Zielsetzung</u> Untersuchung der räumlichen Unterschiede des Windfeldes im Küstenvorfeld der Bundesrepublik Deutschland und zwar - mesokaliage Unterschiede im Hinblick auf die Verbundnetzplanung, - orographisch bedingte Unterschiede im Hinblick auf die Standortwahl für Windkraftanlagen. <u>2. Arbeitsprogramm</u> - EDV-gerechte Aufbereitung vorhandener Windregistrierungen von verschiedenen Orten im deutschen Küstenbereich. - Berechnung von Korrelationen und Häufigkeiten der gleichzeitigen Schwellüberschreitung der Windgeschwindigkeit als Funktion des gegenseitigen Abstandes zur Beurteilung der Effizienz eines Verbundbetriebes von Windkraftanlagen. - Vermessung der orographisch bedingten Veränderung des Windfeldes an einer hohen Düne in List/Sylt mit Hilfe von zwei stationären und einem mobilen Mast, Aufnahme hochaufgelöster Zeitserien des Windes in mehreren Niveaus. - Ableitung der vertikalen Windprofile und der spektralen Verteilung der Turbulenz in Abhängigkeit von der Orographie sowie mehreren Klassen der Windgeschwindigkeit und der Stabilität der Luftschichtung. <u>3. Stand</u> - Verbundbetrieb von Windenergie-Konvertern: Die Aufbereitung von Zeitserien des Windes ist weitgehend abgeschlossen. Testläufe der Programme zur Berechnung kombinierter Häufigkeiten der Windgeschwindigkeit sowie der relativen Energieabgabe von 2 und 3 im Verbund geschalteten Konvertern waren erfolgreich. - Orographische Einflüsse: Datenserien bei unterschiedlichen Atmosphärenbedingungen wurden aufgezeichnet und digitalisiert. Erste Serien werden mit verschiedenen Methoden untersucht.		
Gesamtkosten: DM 222.000,-		Förderanteil des Bundes: 100 %

1146

Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland		Programm-Nr.: 3.3.1.1.8
Programmschwerpunkt: Neue Energiequellen		Gebiet: Windenergie Große Windanlagen und Speicher
Projekt: Die Windverhältnisse im Binnenland der Bundesrepublik Deutschland im Hinblick auf die Windkraftumsetzung (insbesondere Verbundnetzplanungen)		
Laufzeit: 01.07.1979 - 30.06.1980		Projekt-Nr.: 3-ET 1414 A
Durchführung: Deutscher Wetterdienst - Zentralamt-		Unterauftragnehmer:
Verantwortl.-Leiter: Dipl.-Phys. G. Jurksch		
Projektbeschreibung: <u>1. Zielsetzung</u> Mit Hilfe vieljähriger, stündlich ausgewerteter Messungen von Windrichtung und -geschwindigkeit von 74 Stationen des Deutschen Wetterdienstes soll eine Untersuchung insbesondere über Flautenandauer sowie zeitliche und räumliche Verteilung von Flauten- und Starkwindfeldern angestellt werden.		
<u>2. Arbeitsprogramm</u> - Untersuchung der Andauer von Flauten- und Starkwindfeldern im Binnenland der Bundesrepublik Deutschland für Einzelstationen, - Untersuchung des gleichzeitigen Auftretens von Flauten- und Starkwindfeldern in verschiedenen Zonen der Bundesrepublik Deutschland, - Feststellung von Alternativstandorten bei Flautenwetterlagen in bestimmten Zonen mit dem Ziel der Verbundnetzplanung.		
<u>3. Stand</u> Auf der Basis stündlicher Windgeschwindigkeitswerte des Zeitraumes 1969 bis 1974 wurde die räumliche Verteilung von Flauten- und Starkwindfeldern in Abhängigkeit von den Wetterlagen und den Jahreszeiten untersucht. Die Studie ist abgeschlossen, ihre Ergebnisse zur Veröffentlichung vorbereitet.		
Gesamtkosten: DM 120.000,-		Förderanteil des Bundes: 100 %

1149

Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland		Programm-Nr.: 3.3.1.1.11
Neue Energiequellen Programm-Schwerpunkt:		Gebiet: Windenergie Große Windanlagen und Speicher
Projekt: Untersuchung zur Nutzung von Windenergie im Mittelgebirge unter Berücksichtigung von vorhandenen Speichermöglichkeiten		
Laufzeit: 01.04.1979 - 31.05.1983		Projekt-Nr.: 3-ET 4324 A
Durchführung: ELEKTROMARK Kommunales Elektrizitätswerk Mark AG, 5800 Hagen		Unterauftragnehmer: Institut für Meteorologie u. Klimatologie an der TU Hannover, Prof. Dr. R. Roth 3000 Hannover
Verantwortl.-Leiter: Dipl.-Ing. W. Schubotz		
Projektbeschreibung: <u>1. Zielsetzung</u> Durch die Untersuchung soll zunächst das Windenergiepotential an einem speziellen Mittelgebirgsstandort bestimmt werden. Am vorgesehenen Standort (Oberbecken des Pumpspeicherwerkes Rönkhausen, ca. 580 m UNN) werden die Windverhältnisse bis ca. 100 m über Grund gemessen und registriert. Die Meßergebnisse sollen zeigen, inwieweit die Windenergie zur Stromerzeugung in Mittelgebirgen nutzbar ist und welche Vorteile die Speicherung von Windenergie in einem Pumpspeicherwerk mit sich bringt.		
<u>2. Arbeitsprogramm</u> - Ausarbeitung des Meßprogramms - Planung und Bau des Windmeßturms - Messung der Windverhältnisse - Bestimmung der unmittelbar nutzbaren Windenergie - Bestimmung der mittelbar nutzbaren Windenergie in Abhängigkeit von der Anlagengröße bei der Speicherung im Pumpspeicherwerk.		
<u>3. Stand</u> Das Meßprogramm zur Erfassung aller Meßdaten wurde erstellt. Der Meßturm ist fertiggestellt. Alle Meßgeräte sind am Meßturm montiert. Nach Abschluß der Probemessungen sind die ersten Meßdaten aufgezeichnet. Mit Ergebnissen aus den laufenden Messungen ist Anfang 1981 zu rechnen.		
Gesamtkosten: DM 1.392.960,--		Förderanteil des Bundes: 100 %

Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland Neue Energiequellen Programm-Schwerpunkt:	Programm-Nr.: 3.3.1.1.15 Gebiet: Windenergie Große Windanlagen und Speicher
Projekt: Erstellung eines Meß- und Versuchsprogramms GROWIAN	
Laufzeit: 01.11.1979 - 31.05.1980	Projekt-Nr.: 3-ET 4364 A
Durchführung: M.A.N. - NT Dachauer Str. 667 8000 München 50 Verantwortl.-Leiter: Dr.-Ing. F. Körber	Unterauftragnehmer:
<p>Projektbeschreibung:</p> <p><u>1. Zielsetzung</u> Für den Versuchsbetrieb der großen Windenergieanlage GROWIAN soll ein Meß- und Versuchsprogramm erstellt werden. Das Programm definiert Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung.</p> <p><u>2. Arbeitsprogramm</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Konzept für die Meßdatenaufnahme und -verarbeitung - Feststellung notwendiger konstruktiver Modifikation an GROWIAN und baulicher Maßnahmen (Meßturm, Datenstation) - Erstellung eines Betriebssimulationsprogramms - Ausarbeitung von Meßplänen <ul style="list-style-type: none"> - Bestimmung der maßgebenden Windverhältnisse - Ermittlung der Anlagenleistung - Erfassung der Anlagenkinematik und -dynamik - Messung der Belastung - Untersuchungen am elektrischen System - Optimierung der Betriebsführung - Darstellung der Emissionen und Immissionen - Aufstellen eines Schemas für die zusammenfassende Darstellung des Betriebsverhaltens anhand von Meßergebnissen. <p><u>3. Stand</u> Für den Versuchsbetrieb der großen Windenergieanlage GROWIAN wurde ein Meß- und Versuchsprogramm erstellt. Es berücksichtigt insbesondere die <u>Aktion</u> des Windes und die <u>Reaktion</u> der Anlage bei der Erfassung der Dynamik, der Belastung und der Regelvorgänge. Zur Windmessung ist ein Meßgitter geplant, das die Rotorfläche in 25 m - Schritten abdeckt und schnelle Momentanwertmessung erlaubt. Die Normleistung und die Wirkungsgrade der Energiewandlung sollen vermessen werden. Hierzu gehören auch Untersuchungen zur Rotor aerodynamik und zu den Rotorbetriebszuständen. Das Verhalten der doppeltgespeisten Asynchronmaschine am Netz sowie die Betriebsführungsstrategie sollen überprüft werden. Zur Planung des Meßprogramms gehört auch die Erfassung der Anlagenemission von Schall und Fernsehstörungen. Die Meßprozeduren werden dargestellt und ein Konzept für die Datenaufnahme und -verarbeitung entwickelt.</p>	
Gesamtkosten: DM 940.434,-	Förderanteil des Bundes: 100 %

1159

Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland		Programm-Nr.: 3.3.1.1.20
Programm-Schwerpunkt: Neue Energiequellen		Gebiet: Windenergie Große Windanlagen und Speicher
Projekt: Vergleichende Untersuchung der Möglichkeiten der Integration von Windenergie in die nationale Stromversorgung ausgewählter Länder		
Laufzeit: 01.10.1979 - 31.12.1981		Projekt-Nr.: 3- ET 1157 A
Durchführung: Universität Regensburg 8400 Regensburg IEA-Projekt		Unterauftragnehmer:
Verantwortl.-Leiter: L. Jarass		
<p>Projektbeschreibung:</p> <p><u>1. Zielsetzung</u></p> <p>Für die teilnehmenden Länder Japan, Niederlande, Schweden und USA sollen die technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten einer großtechnischen Umwandlung von Windenergie in elektrische Energie unter besonderer Berücksichtigung des benötigten Reserve- und Speichersystems abgeschätzt werden. Insbesondere sollen dabei die Möglichkeiten der Integration von Windenergie in die allgemeine Energieversorgung für die einzelnen Länder näher untersucht und miteinander verglichen werden. Die bereits während Phase I erstellten Modelle und Programme, die für die Bundesrepublik angewendet wurden, sowie die dort gewonnenen Erfahrungen sollen für die Phase II genutzt werden.</p> <p><u>2. Arbeitsprogramm</u></p> <p>Datenbeschaffung:</p> <p>Im Rahmen der Phase II sollen zunächst stündlich Energienachfragedaten, stündliche Windgeschwindigkeitsdaten sowie Kostenangaben der herkömmlichen Energieversorgung für die teilnehmenden Länder gesammelt werden. Den teilnehmenden Ländern fällt dabei die Aufgabe zu, die benötigten Daten in der gewünschten Form auf Datenbändern verfügbar zu machen.</p> <p>Datenverarbeitung:</p> <p>Die Daten werden zusammengestellt, computergerecht aufbereitet und in Platten bzw. Banddateien abgespeichert.</p> <p>Bestimmung der Energieflüsse eines integrierten Windenergieversorgungssystems mit Hilfe des bereits in Phase I entwickelten SWING-Modells.</p> <p>Analyse der durch die Simulation gewonnenen Ergebnisse und Bewertung mit Hilfe der Kostendaten. Bestimmung des Wertes von Windenergie.</p> <p>Vergleich der Ergebnisse der teilnehmenden Länder incl. der bereits aus Phase I bekannten Ergebnisse für die Bundesrepublik Deutschland.</p> <p><u>3. Stand</u></p> <p>Entsprechend dem Arbeitsprogramm ist die Untersuchung für die Niederlande nahezu abgeschlossen. Die Untersuchung für Schweden ist in fortgeschrittenem Stadium, d.h. die Erhebung der Daten und die Berechnung des Outputs an elektrische Energie für verschiedene Windkraftanlagen ist abgeschlossen. Erhebung und Sammlung der Daten für Japan und die USA sind teilweise abgeschlossen.</p>		
Gesamtkosten: DM 563.094,-		Förderanteil des Bundes: 40 %

1161

Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland Neue Energiequellen Programm-Schwerpunkt:	Programm-Nr.: 3.3.1.1.24 Gebiet: Windenergie Große Windanlagen und Speicher
Projekt: Darstellung realistischer Regionen für die Errichtung insbesondere großer Windenergieanlagen in der Bundesrepublik Deutschland	
Laufzeit: 01.01.1981 - 31.12.1982	Projekt-Nr.: 3-ET 4448 A
Durchführung: Lahmeyer International GmbH Postfach 71 02 30 6000 Frankfurt am Main 71	Unterauftragnehmer: MAN Neue Technologien, München
Verantwortl.-Leiter: Dipl.-Ing. L. Henke	
Projektbeschreibung: <u>1. Zielsetzung</u> Für die Nutzung der Windenergie geeignete realistische Regionen in der BRD sollen eingegrenzt werden. Standorte für Windkraftwerke im MW-Bereich sowie mögliche Verbundnetze sollen erarbeitet werden, um das mit Anlagen im MW-Bereich nutzbare Windpotential zu ermitteln. <u>2. Arbeitsprogramm</u> - Eingrenzung meteorologisch geeigneter Regionen unter Einbeziehung der Off-Shore-Gebiete der Nordsee - Ermittlung geeigneter Gebiete für Standorte unter nichtmeteorologischen Gesichtspunkten - Aufstellen eines Kataloges über Windkraftanlagen im MW-Bereich - Zuordnung von Windkraftanlagen zu geeigneten Gebieten - Untersuchung von Verbundnetzen - Zusammenfassende Darstellung des realistischen Windpotentials für Anlagen im MW-Bereich <u>3. Stand</u> Beginn der Untersuchungen 01.01.1981	
Gesamtkosten: DM 748.000,--	Förderanteil des Bundes: 100 %

Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland Neue Energiequellen Programm-Schwerpunkt:	Programm-Nr.: 3.3.1.2.1 Gebiet: Windenergie Kleine Windenergieanlagen, Windmessungen, Anwendungen
Projekt: Meteorologische Messungen zur Standortwahl für Windenergieanlagen im Küstengebiet	
Laufzeit: 01.03.1977 - 30.04.1981	Projekt-Nr.: 3-ET 4105 A
Durchführung: TU Hannover Institut für Meteorologie und Klimatologie, Herrenhäuser Str. 2 3000 Hannover 21 Verantwortl.-Leiter: Prof. Roth, Dr. Tetzlaff	Unterauftragnehmer:
Projektbeschreibung: <u>1. Zielsetzung</u> - Erfassung von Windgeschwindigkeits- und Temperaturschwankungen unter besonderer Berücksichtigung der Rauigkeit des Geländes. - Vergleich der Leistungsfähigkeit von Grenzschichtmodellen zur Ergänzung der punktuellen Messungen in datenarmen Gebieten. <u>2. Arbeitsprogramm</u> - Sonderexperimente zur Erfassung der schnellen Schwankungen im Sommer und Herbst. - Aufbau und Installation des sechsten Messturmes bei Bremerhaven. - Sonderexperiment zur Erfassung meteorologischer Parameter bis 200 m Höhe. <u>3. Stand</u> Im Berichtsjahr 1980 wurden die Messungen an der Station Bremerhaven aufgenommen. Die Anemometer der bereits seit über einem Jahr im Betrieb befindlichen Stationen wurden noch einmal nachgeeicht. Aufgrund der inzwischen erreichten hohen Betriebsstundenzahl wurden die Meßgeräte überholt und einige Teile gegen neue ausgetauscht. Vor Inbetriebnahme der überholten Geräte wurde dann noch einmal eine Eichung vorgenommen. Die Meßdaten sind in einer Datenbank organisiert worden, so daß auf einen Tag, einen Monat und auf ein Jahr zugegriffen werden kann. Weiterhin wurde ein Rechenprogramm ausgearbeitet, welches unter Berücksichtigung unterschiedlicher Rauigkeiten und Stabilitätsklassen die Windgeschwindigkeit von 46 Meter Höhe bis auf 150 Meter Höhe hochrechnet und aus diesen Werten eine Häufigkeitsverteilung bestimmt, so daß eine Abschätzung des Windenergiepotentials auch für Höhen oberhalb von 46 Meter Höhe möglich ist. Für die aus Bodenluftdruckwerten berechneten geostrophischen Winde wurde für alle sechs Meßstandorte eine Häufigkeitsverteilung bestimmt. Diese Auswertungen bilden die Grundlage zur Auswahl typischer Windsituationen, die mit dem numerischen Modell simuliert werden. Es wurde die Entwicklung der Modellatmosphäre für die häufigste Windrichtung SW in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen, die das Windfeld wesentlich beeinflussen, getestet.	
Gesamtkosten: DM 1.391.878,--	Förderanteil des Bundes: 100 %

1163

Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland		Programm-Nr.: 3.3.1.2.2	
Neue Energiequellen Programm-Schwerpunkt:		Gebiet: Windenergie Kleine Windenergieanlagen, Windmessungen, Anwendungen	
Projekt: Windmessungen in großer Höhe (150 m Mast)			
Laufzeit: 01.11.1978 - 31.12.1984		Projekt-Nr.: 3-ET 4254 A	
Durchführung: Hamburgische Electricitäts- werke AG - Grundsatzplanung Überseering 12 2000 Hamburg 60 Dipl.Ing. Witt Verantwortl.-Leiter: Frau Bergmann		Unterauftragnehmer: Universität Hannover Inst. f. Meteorologie und Klimatologie Prof.Dr. Roth	
<p>Projektbeschreibung:</p> <p><u>1. Zielsetzung</u> An einem Standort der norddeutschen Küste soll ein Höhenprofil des Windes bis 150 m Höhe ermittelt werden. Dieses Windprofil dient zum Vergleich mit dem aus den 50 m hohen Meßtürmen rechnerisch extrapolierten Windprofil bis 150 m sowie als Datenmaterial für die Auslegung großer Windenergieanlagen, die je nach Nabenhöhe und Rotordurchmesser die Windenergie von 25 m bis 175 m nutzen.</p> <p><u>2. Arbeitsprogramm</u> - Erstellung des 150 m hohen Windmeßturmes mit seinen Meßeinrichtungen. - Erfassen des Höhenprofils des Windes bis 150 m Höhe. - Sammeln von Daten während extremer Windverhältnisse (Böen) durch gezielte schnelle Messungen. - Vergleich von rechnerisch ermittelten Windprofilen mit einem gemessenen Windprofil. - Auswertung der Messungen im Hinblick auf die kommerzielle Nutzung großer Windenergieanlagen im norddeutschen Küstenraum.</p> <p><u>Beziehung zu anderen Vorhaben</u> Projekt-Nr. ET 4342 A,</p> <p><u>3. Stand</u> <u>Baufortschritt Windmeßturm</u> Der Windmeßturm wurde im Berichtsjahr aufgestellt und am 02.09.1980 abgenommen. Die Flugwarnbefeuerung und der Warnanstrich des Turmes wurden am 15.10. von einem Beauftragten des Ministeriums für Wirtschaft und Verkehr des Landes Schleswig-Holstein geprüft.</p> <p><u>Baufortschritt meteorologische Einrichtungen</u> Der Auftrag für die Lieferung der meteorologischen Meßgeräte und für die Meßwertregistrierung wurde am 15.02.1980 der Firma Friedrichs erteilt, die auch mit der Montage der meteorologischen Einrichtungen beauftragt wurde. Die meteorologische Ausrüstung des Turmes wurde am 02.10.1980 von der Firma Friedrichs übergeben. Die Anlage ist seit dem 02.10.1980 in Betrieb. Mit der Auswertung der meteorologischen Meßwerte wurde das Institut für Meteorologie und Klimatologie der Technischen Universität Hannover beauftragt.</p> <p><u>Nebenanlagen:</u> Für die Stromversorgung des Windmeßturmes wurde ein Betriebsgebäude aufgestellt, in dem auch die meteorologischen Registriergeräte und das behördlicherseits vorgeschriebene Notstromaggregat untergebracht sind.</p>			
Gesamtkosten: DM 1.190.000,--		Förderanteil des Bundes: 50 %	

1168

Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland Programm-Schwerpunkt: Neue Energiequellen	Programm-Nr.: 3.3.1.2.6
	Gebiet: Windenergie Kleine Windenergieanlagen, Windmessungen, Anwendungen
Projekt: Auslegung und Standardisierung der meteorologischen Messungen zur Vermessung von Wind-Energie-Konvertern	
Laufzeit: 01.01.1978 - 31.10.1980	Projekt-Nr.: 3 - ET 3030 A
Durchführung: Institut für Meteorologie und Klimatologie, Universität Hannover Herrenhäuser Str. 2 3000 Hannover 21 Verantwortl.-Leiter: Prof. Dr. R. Roth	Unterauftragnehmer:
Projektbeschreibung: <u>1. Zielsetzung</u> Empfehlungen zu erarbeiten, die eine hinsichtlich den meteorologischen Bedingungen korrekte Vermessung von Windenergieanlagen gestattet. <u>2. Arbeitsprogramm</u> Das Projekt umfaßt die Kalibrierung von Anemometern im Windkanal unter Laborbedingungen sowie die Untersuchung des Verhaltens unter typischen Einsatzbedingungen in der Grenzschicht der Atmosphäre. Letzteres ge- schieht in einem Freilandexperiment, bei dem vor allem der Einfluß der thermischen Schichtung der Atmosphäre, die die Struktur der Turbulenz und über diese die Fehler der rotierenden Anemometer beeinflusst, unter- sucht werden soll. Aufgrund dieser Ergebnisse und der Kenntnisse der Struktur der Grenzschicht der Atmosphäre aus Modellen und aus der Empirie soll ein Vorschlag ausgearbeitet werden, mit welcher zeit- lichen und vertikalen Auflösung WECS vermessen werden müssen, um richtige und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Das Problem der Vermessung der Nachlaufströmung, das vor allem dann wichtig wird, wenn man an den Betrieb von mehreren räumlich benach- barten WECS denkt, erfordert in diesem Zusammenhang besondere Auf- merksamkeit. <u>3. Beziehung zu anderen Projekten</u> Zeitparallel werden Untersuchungen zum Windenergieangebot im Bereich der Nordseeküste durchgeführt (ET 4105 A). Weitere Beziehungen beste- hen zu den anderen von der gleichen Stelle geförderten Windenergie- programmen. <u>4. Stand</u> Zum 31.10.1980 wurde das Forschungsvorhaben abgeschlossen. Die Untersuchungen erstreckten sich auf zwei Gebiete, die handelsüb- lichen Meßinstrumente und die Standardbeschreibung der Windprofile. Als Windmeßgeräte wurden in allen Ländern der Welt vorzugsweise Scha- lenkreuzanemometer eingesetzt. Sie weisen einen typischen Fehler, das sog. 'overspeeding', auf, der je nach dem turbulenten Zustand der	
Gesamtkosten: DM 255.689,--	Förderanteil des Bundes: 100 %

<p>Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland</p> <p>Programm-Schwerpunkt: Neue Energiequellen</p>	<p>Programm-Nr.: 3.3.1.2.6</p> <p>Gebiet: Windenergie Kleine Windenergieanlagen, Windmessungen, Anwendungen</p>
<p>Atmosphäre einige Prozent bis zu etwa 15% des Mittelwertes ausmacht. Für einige Typen wurde dieser Fehler quantitativ untersucht. Er wirkt sich bei der Extrapolation von Windgeschwindigkeitswerten in größeren Höhen aus und vergrößert sich mit zunehmender Extrapolationshöhe.</p> <p>Die vermessenen Anemometertypen weisen deutliche Unterschiede hinsichtlich des 'overspeedings' auf. Bei Auswahl von geeigneten Meßfühlern und Berücksichtigung der ermittelten Stabilitäts- und höhenabhängigen Korrekturen können bei Benutzung von Schalenkreuzanemometern zuverlässige Werte der Windgeschwindigkeit zur Vermessung von WECS erhalten werden. Ohne Berücksichtigung der Ergebnisse des Vorhabens sind Fehler zu erwarten, die die angestrebte Meßgenauigkeit deutlich übersteigen.</p> <p>Die am häufigsten anzutreffenden Formen der Windprofile weisen eine so starke Krümmung auf, daß bei der Verwendung von nur einem Anemometer in Abhängigkeit vom Mittelintervall und den Randbedingungen Fehler für die mittlere Geschwindigkeit auf der Rotorebene von etwa 10% typisch sind.</p> <p>Die Standardisierung der Leistungsvermessung von WECS erfordert ferner die Verwendung von hinreichend langen Mittelwerten, über horizontal homogenen Gelände, über inhomogenem Gelände ist eine mindestens zweidimensionale Anordnung der Meßfühler notwendig. Zur Windenergieprospektion dienen Messungen an repräsentativen Standorten mit Anemometern, die Mittelwerte für Zeiträume von etwa einer Stunde richtig angeben. Mathematisch-numerische Modelle können hier bei entsprechender Kalibrierung Messungen ersetzen. Sie besitzen den Vorteil über Flächen von einigen Quadratkilometern zu mitteln.</p>	

1177

Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland		Programm-Nr.: 3.3.1.2.12
Programm-Schwerpunkt: Neue Energiequellen		Gebiet: Windenergie Kleine Windenergieanlagen Windmessungen, Anwendungen
Projekt: Die Windverhältnisse in überseeischen Ländern, im Hinblick auf Windkraftnutzung zur Exportförderung der deutschen Industrie		
Laufzeit: 01.07.1979 - 31.12.1981		Projekt-Nr.: 3-ET 1415 A
Durchführung: Deutscher Wetterdienst Frankfurter Str. 135 6050 Offenbach a.M.		Unterauftragnehmer:
Verantwortl.-Leiter: Dr. G. Duensing		
Projektbeschreibung: <u>1. Zielsetzung</u> Als Entscheidungshilfe für Planung und Ausführung von Windkraftanlagen in Übersee sollen für ausgewählte Länder die Windverhältnisse sowie die relevanten klimatologischen Einflußgrößen untersucht werden.		
<u>2. Arbeitsprogramm</u> - Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit. - SchwellwertÜberschreitungsdauer verschiedener Geschwindigkeitsstufen. - Windrichtungsverteilungen. - Vertikalprofile des horizontalen Windes mittels geeigneter theoretischer oder empirischer Ansätze. - Häufigkeitsverteilung und Extremwertstatistik zusätzlicher relevanter Wetterelemente. - Kurze Klimatologie der jeweiligen Region.		
<u>3. Stand</u> - Die Datenerfassung und die EDV-Programmierarbeiten wurden fortgesetzt, - dem Arbeitsprogramm folgend stehen die Auswertearbeiten für die saudi-arabischen Stationen vor dem Abschluß. Die Darstellungen des Windenergieangebotes sowie die relevanten zusätzlichen Klimainformationen liegen vor. Die erste Abschätzung zeigt, daß das Windenergieangebot in Saudi-Arabien nur etwa 10 - 15 % des Angebotes in den deutschen Küstenregionen ausmacht, - das Datenmaterial ist aus fast allen Ländern des Projektes eingetroffen und - je nach Eignung - für die Erfassung vorbereitet oder in den Erfassungsprozeß einbezogen worden, - bei der Datensichtung wurden auch aus Ländern außerhalb des Projektes detaillierte Windmessungen gefunden.		
Gesamtkosten: DM 378.000,-		Förderanteil des Bundes: 100 %

1181

Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland		Programm-Nr.: 3.3.1.2.16
Neue Energiequellen Programm-Schwerpunkt:		Gebiet: Windenergie Kleine Windenergieanlagen, Windmessungen, Anwendungen
Projekt: Die Variabilität des Windvektors bis 200 m Höhe an der deutschen Küste im Hinblick auf die Windkraftnutzung		
Laufzeit: 01.07.1979 - 31.12.1981		Projekt-Nr.: 3-ET 4358 A
Durchführung: Deutscher Wetterdienst Seewetteramt Bernhard-Nocht-Str. 76 2000 Hamburg 4		Unterauftragnehmer:
Verantwortl.-Leiter: Dr. Georg Duensing		
Projektbeschreibung: <u>1. Zielsetzung</u> Untersuchung der vertikalen Unterschiede des Windfeldes im Küstenvorfeld der Bundesrepublik Deutschland mittels DOPPLER-SODAR zur Bestimmung realistischer Lastannahmen für Bauwerkskonstruktionen großer Windkraftanlagen. <u>2. Arbeitsprogramm</u> Untersuchung der vertikalen Struktur des Windfeldes mittels DOPPLER-SODAR und Schalenkreuzanemometer. Ermittlung quantitativer Angaben über kurzzeitige Windvariationen, die den Betrieb einer Windenergieanlage gefährden können. Überprüfung verschiedener Profilansätze zur Extrapolation des Bodenwindes in größere Höhen für verschiedene atmosphärische Bedingungen. <u>3. Stand</u> Die technischen und bauseitigen Anforderungen wurden definiert. Die Beschaffung des SODARs und anderer Elektronik wurde eingeleitet.		
Gesamtkosten: DM 569.050,--		Förderanteil des Bundes: 100 %

1183

Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland		Programm-Nr.: 3.3.1.2.18
Neue Energiequellen Programm-Schwerpunkt:		Gebiet: Windenergie Kleine Windenergieanlagen, Windmessungen, Anwendungen
Projekt: Entwicklung eines einfachen Windmeßgerätes für Entwicklungsländer		
Laufzeit: 01.10.1979 - 31.03.1981		Projekt-Nr.: 3-ET 4373 A
Durchführung: Fachhochschule Aachen Fachbereiche 6 und 7a, 51 Aachen Prof.Dr.-Ing. W. Hallmann Verantwortl.-Leiter: Prof.Dr.-Ing. R. Grundmann		Unterauftragnehmer:
Projektbeschreibung: <u>1. Zielsetzung</u> Entwicklung eines speziellen Windmeßgerätes als Prototyp, das im Gegensatz zu einem reinen Geschwindigkeitsmesser (z.B. Anemometer) die spezifische Windenergie über einen längeren Zeitraum von ca. 6 Monaten erfaßt und mechanisch ohne Fremdenergie registriert. Als Einsatzgebiete sind geeignete Entwicklungsländer vorgesehen. Die Ergebnisse dieser Messungen sollen als Entscheidungsgrundlage dienen, ob sich die Installation von z.B. Windkraftpumpen zur Wasserförderung lohnt bzw. wo diese Anlagen örtlich vorzusehen sind. <u>2. Arbeitsprogramm</u> - Vorversuche zur Festlegung des Windradtyps, wobei prinzipiell auch eine Axialturbine vorgesehen ist. - Projektierung einer entsprechenden Konstruktion, die störungsfreien Lauf über einen längeren Zeitraum ohne Wartung, bei extremen Umweltbedingungen (Hitze, Kälte, Staub, Sand, Regen) gewährleistet. - Ermittlung eines physikalisch sinnvollen "Schwellmomentes", so daß das Gerät erst bei vorgegebener minimaler Windgeschwindigkeit anspricht. Dieses Schwellmoment soll durch eine geeignete Bremse erzeugt werden und dient gleichzeitig als Belastungsmoment. - Entwicklung dieser Bremse. - Fertigung des Gerätes. - Prüfung und Eichung des Gerätes im Windkanal. - Entwicklung einer erweiterten Datenerfassung, z.B. Messung in zwei voneinander getrennten Windgeschwindigkeitsbereichen. <u>3. Stand</u> Für das Windmeßgerät wurden im Windkanal zwei serienmäßig produzierte Laufradtypen untersucht: ein Axialventilatorrad und ein Propellerrad. Es hat sich gezeigt, daß grundsätzlich beide Radtypen geeignet sind. Das Schwellmoment, das gleichzeitig auch als konstantes Belastungsmoment dient, wird durch eine Hysteresebremse in radialer Bauart verstellbar. Die Meßwerterfassung erfolgt mechanisch über einen Umdrehungszähler, wobei ein Untersetzungsgetriebe dazwischengeschaltet werden kann, wenn die Zählerkapazität für das gewünschte Ablesintervall zu klein ist. Zwei Fragestellungen lassen sich mit diesem Gerät beantworten: 1. Die Ermittlung der mittleren Windgeschwindigkeiten im Ableszeitraum am Aufstellungsort.		
Gesamtkosten: DM 145.000,--		Förderanteil des Bundes: 100 %

Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland	Programm-Nr.: 3.3.1.2.18
Neue Energiequellen Programm-Schwerpunkt:	Gebiet: Windenergie Kleine Windenergieanlagen, Windmessungen, Anwendungen
<p>2. Die Bestimmung der Windleistung am Aufstellungsort über die im Windkanal ermittelte Eichkurve.</p> <p>Die abschließenden Untersuchungen werden sich beziehen auf:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) eine kleinere mehrstufige Hysteresebremse, die besser im Gehäuse untergebracht werden kann, b) ein elektrisches Gerät als Alternative zum mechanischen, c) die Ermittlung der kostengünstigsten Ausführung. 	

1185

Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland		Programm-Nr.: 3.3.1.2.19
Neue Energiequellen Programm-Schwerpunkt:		Gebiet: Windenergie Kleine Windenergieanlagen, Windmessungen, Anwendungen
Projekt: Entwicklung eines einfachen Anemometers zur Klassifizierung des Windes		
Laufzeit: 01.11.1979 - 31.12.1980		Projekt-Nr.: 3-ET 4374 A
Durchführung: Theodor Friedrichs & Co., Borgfelde 6 POB 1105 2000 Schenefeld		Unterauftragnehmer: Fachhochschule Ulm Prittwitzstr. 10 POB 3860 7900 Ulm
Verantwortl.-Leiter: H.-J. Friedrichs (Ing.grad)		
Projektbeschreibung: <u>1. Zielsetzung</u> Es wird ein Windmeßgerät bis zur Serienreife entwickelt, um Aussagen für die Errichtung einer Windenergieanlage zu erhalten. Dazu wird die Windgeschwindigkeit gemessen und in Kategorien (vier oder sechs eingeteilt). <u>2. Arbeitsprogramm</u> - Entwicklung des Windgebers - Studien an Rollenzählwerken, ob Funktionstätigkeit im Bereich rel. Feuchte von 15 % ... 96 % gewährleistet ist - Erstellung der Aufbereitungselektronik zur Klassifizierung <u>3. Stand</u> Das Gerät gliedert sich im wesentlichen in 2 Komponenten: Der Meßwertgeber und die Logik- und Zählereinheit. Beide Komponenten wurden bis zur Prototypreife entwickelt und erprobt. Dies umfaßte im einzelnen: <u>Meßwertgeber:</u> Verwendet wird ein modifiziertes Schalenkreuz-Anemometer Typ Friedrichs 4031 (als Impulsgeber wird ein einfacher Reed-Kontakt eingesetzt). Durch Versuche im Windkanal der Universität Hamburg konnte eine genaue Einstufung des Verhältnisses des zurückgelegten Windweges zur abgegebenen Impulszahl vorgenommen werden. <u>Logik- und Zählereinheit:</u> Durch zahlreiche Versuchsreihen konnten Fehler an der Zählelektronik beseitigt sowie Verbesserungen angebracht werden. Erprobt wurden dabei insbesondere: a) Langzeitgenauigkeit des Quarztaktes für die Zählimpulse b) Übereinstimmung des Wertes im Summenzähler mit der Summe der Einzelzählerwerte c) Verhalten bei Impulsen direkt an den Kategoriegrenzen d) Gesamtverhalten bei unterschiedlichen (auch extremen) klimatischen Bedingungen. Eine Versuchsreihe im Klimaschrank ergab, daß das Gerät einwandfrei arbeitet bei allen vorkommenden Luftfeuchtwerten und bei Temperaturen von -20° C bis +50° C (dabei wird die obere Temperaturgrenze durch die zulässige Umgebungstemperatur für die verwendeten Trockenbatterien gebildet. Zur Zeit werden Geber und Zählereinheit gemeinsam einer Langzeiterprobung im Freien unterzogen, die bisher einwandfreie Ergebnisse zeigt. Das F + E-Vorhaben kann demnach zielgerecht Ende 1980 abgeschlossen werden. Das serienreife Gerät wird voraussichtlich im 1. Halbjahr 1981 auf dem Markt erscheinen.		
Gesamtkosten: DM 55.475,--		Förderanteil des Bundes: 75 %

PLE · Projektleitung Energieforschung, KFA Jülich GmbH · D-5170 Jülich 1 · Postfach 1913 · Tel. 02461/611 · Telex 833556 kfa d

1190

Programm Energieforschung und Energietechnologien der Bundesrepublik Deutschland		Programm-Nr.: 3.3.1.2.25
Neue Energiequellen		Gebiet: Windenergie Kleine Windenergieanlagen, Windmessungen, Anwendungen
Programm-Schwerpunkt:		
Projekt: Simultane Windgeschwindigkeitsmessungen hoher Zeitauf- lösung in verschiedenen großen Höhen für die Auslegung von Windenergiekonvertern		
Laufzeit: 01.12.1979 - 31.12.1981		Projekt-Nr.: 3 - ET 4348 A/B
Durchführung: ATW-GmbH (Forschungsgesellsch. für Alternative Technologien und Wirt- schaftsanalysen), Regensburg		Unterauftragnehmer: in Zusammenarbeit mit der Universität Regensburg
Verantwortl.-Leiter: Prof. Dr. G. Obermair		
Projektbeschreibung: <u>1. Zielsetzung</u> <p>Die Optimierung der Auslegung, vor allem aber die Betriebssicherheit (Bruchsicherung, Systemschwingungen, etc.) erfordern die Anpassung einer großen Windkraftanlage an real auftretende momentane Windfelder. Zeitlich und räumlich rasch wechselnde abnorme Kräfte und Momente an Rotorblättern und Turm werden weder durch lokale Zeitmittelwerte noch durch die bisher verfügbaren Daten über <u>lokale</u> Kurzzeitwerte erfaßt, auch bei Berücksichtigung der Scherung der Mittelwerte von Betrag und Richtung des Windes. Vielmehr werden Simultanwerte über den ganzen Rotorquerschnitt und Kurzzeitkorrelationen (etwa über eine Umdrehungszeit) benötigt. Deshalb sollen an zwei schlanken und sehr hohen Türmen Messungen des vertikalen Windprofils mit hoher Zeitauf- lösung, später an einem geeigneten Träger auch entsprechende laterale Messungen durchgeführt werden.</p>		
<u>2. Arbeitsprogramm</u> <p>a) Endgültige Auswahl der Träger für die Meßeinrichtungen und der Art der Bestückung b) Auswahl und Bestellung der Meß- und Aufzeichnungsgeräte c) Eichung der Meßgeräte und technische Tests der gesamten Meßanlagen d) Installation und Probelaufe e) Durchführung der Messungen und begleitende Auswertungen f) Gesamtauswertung</p>		
<u>3. Stand</u> <p>Die Träger der Meßeinrichtungen wurden ausgewählt: a) Sendemast Aurich (Ostfriesland): Meßhöhen 60, 120, 180, 240 m b) Sendemast ("Hohe Linie" bei Regensburg: Meßhöhen 45, 95, 140 m) Alle Komponenten des Systems wurden spezifiziert, bestellt und zum großen Teil bereits geliefert. Die Anemometer wurden im Windkanal geeicht. In Zusammenarbeit mit dem Norddeutschen Rundfunk und dem Bayerischen Rundfunk, der Firma Hein, Lehmann AG und dem Meteorologischen Institut der Universität München (Dr. Schroers) wurde die Installation der Windmeßanlage vorbereitet. Es wurde besonders auf hohe Sicherheit bei der Datenübertragung geachtet (digitale Übertragung, vielfache Abschirmung). Für die Auswertung der Daten wurden Fehlersuch- und Organisationsprogramme entwickelt und getestet.</p>		
Gesamtkosten: DM 392.145,00 301.470,00		Förderanteil des Bundes: 100 %

AUTORENREGISTER

=====

Seite

Wolfgang Beckröge	ATW GmbH, Regensburg	117
Klaus Berberich	Univ. Regensburg	117
Reinhard Beyer	Univ. Hannover	1
Georg Duensing	Deutscher Wetter- dienst, Seewetteramt	30, 42, 99, 185
Hans Joachim Friedrichs	Firma Friedrichs	70
Reinhard Grundmann	FH Aachen	61
Willi Hallmann	FH Aachen	61
Robert Hartel	RWTH Aachen	82
Günter Jurksch	Deutscher Wetter- dienst, Zentralamt	24
Friedrich Körber	MAN - Neue Techno- logie	247
Heidrun Laude	Univ. Hannover	138
Günther Neuwerth	RWTH Aachen	82
Gustav Obermair	Univ. Regensburg	117
Horst Schäfer	FH Aachen	61
Heiner Schmidt	Deutscher Wetter- dienst, Seewetteramt	30, 128 185
Gerd Tetzlaff	Univ. Hannover	138, 196
Sabine Theunert	Univ. Hannover	196
Reinhard Trapp	Univ. Hannover	13